



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**PSEUDO-DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY VYŠŠÍHO  
ŘÁDU**

PSEUDO-DIFFERENTIAL HIGHER-ORDER FREQUENCY FILTERS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jiří Jeleček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Ondřej Sládok**

**BRNO 2019**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Jiří Jeleček

**ID:** 145437

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pseudo-diferenční kmitočtové filtry vyššího řádu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je prostudovat problematiku pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů a následně na základě získaných znalostí navrhnout funkční pseudo-diferenční kmitočtové filtry vyššího řádu v napěťovém režimu. Nejvhodnější navrženou strukturu dále podrobte experimentálnímu měření a výsledky porovnejte s teorií. Vyhodnoťte obvod s pohledu potlačení souhlasného signálu (CMMR), potlačení napájecího napětí (PSRR) a zkreslení zpracovávaného signálu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] O. Sladok, J. Koton, N. Herencsar, „Universal Pseudo-Differential Filter Using DDCC and DVCCs“. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2017, vol. 23, no. 6, p. 46-52. ISSN: 1392-1215. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.23.6.19694>
- [2] J. Koton, N. Herencsar, O. Sladok, J. Horng, „Pseudo-differential second order band reject filter using current conveyors“. AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 70, no. 6, pp. 814-821, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2016.03.009>

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Sládok

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato Diplomová práce se zabývá pseudo-diferenčními kmitočtovými filtry vyššího řádu pracující v napěťovém režimu. Práce se věnuje popisem kmitočtových filtrů, jejich typů a využití. Následuje rozbor diferenčních a pseudo-diferenčních přenosů. Další část obsahuje popis použitých aktivních prvků (konvektorů) v práci (CCII, DVCC, DDCC, UCC). V poslední části se práce věnuje vlastnímu návrhu pseudo-diferenčního filtru vyššího řádu. Funkčnost návrhu je ověřena experimentální simulací.

## **Klíčová slova**

Pseudo-diferenční filtr, aktivní prvek, diferenční struktura, kmitočtový filtr, dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zadrž, fázovací článek.

## **Abstract**

This Master's thesis deals with pseudo-differential frequency higher order filters working in voltage mode. The thesis deals with the description of frequency filters, their types and applications. Follows an analysis of differential and pseudo-differential transmissions. Next part contains a description of used active elements (conveyors) at thesis (CCII, DVCC, DDCC, UCC). In the last part the thesis is devoted to the own design of the pseudo-differential filter. Design functionality is verified by experimental simulation.

## **Keywords**

Pseudo-differential filter, active element, differential structure, frequency filter, low pass, high pass, band pass, band reject, all pass

JELEČEK, Jiří. Pseudo-diferenční kmitočtové filtry vyššího řádu. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115426>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Sládok.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Pseudo-diferenční kmitočtové filtry vyššího řádu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřejovi Sládokovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a praktické rady.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1 KMITOČTOVÉ FILTRY .....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ FILTRŮ .....	13
1.2 SELEKTIVNÍ FILTRY .....	13
1.2.1 FILTR TYPU DOLNÍ PROPUST .....	14
1.2.2 FILTR TYPU HORNÍ PROPUST .....	15
1.2.3 FILTR TYPU PÁSMOVÁ ZÁDRŽ .....	15
1.2.4 FILTR TYPU PÁSMOVÁ PROPUST .....	15
1.2.5 FILTR TYPU FÁZOVACÍ ČLÁNEK .....	16
<b>2 DEFINICE NEDIFERENČNÍCH PŘENOSŮ .....</b>	<b>17</b>
<b>3 DEFINICE PSEUDO-DIFERENČNÍCH PŘENOSŮ .....</b>	<b>18</b>
3.1 ZOBRAZENÍ SOUHLASNÉHO SIGNÁLU – CMRR .....	19
3.2 ZOBRAZENÍ POTLAČENÍ NEŽÁDOUCÍHO NAPÁJECÍHO SIGNÁLU – PSRR	20
<b>4 PLNĚ DIFERENČNÍ FILTRY .....</b>	<b>21</b>
4.1 TRANSFORMACE PODÉLNÝCH STUKTUR .....	21
4.2 TRANSFORMACE PŘÍČNÝCH STUKTUR .....	22
4.3 TRANSFORMACE NESYMETRICKÝCH FILTRŮ NA PSEUDO-DIFERENČNÍ	23
4.3.1 TRANSFORMACE NEDIFERENČNÍHO VSTUPU NA VSTUP	
DIFERENČNÍ V NAPĚŤOVÉM REŽIMU .....	23
4.3.2 TRANSFORMACE NEDIFERENČNÍHO VÝSTUPU NA VÝSTUP	
DIFERENČNÍ V NAPĚŤOVÉM REŽIMU .....	24
<b>5 AKTIVNÍ PRVKY POUŽITÉ V NÁVRHU .....</b>	<b>26</b>
<b>6 VLASTNÍ NÁVRH PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU PRACUJÍCÍHO</b>	
<b>V NAPĚŤOVÉM REŽIMU .....</b>	<b>30</b>
<b>7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE .....</b>	<b>33</b>
7.1 MĚŘENÍ A SIMULACE PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU .....	33
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>40</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>42</b>
<b>OBSAH PŘILOŽENÉHO CD .....</b>	<b>43</b>
<b>PŘÍLOHA A – PROVEDENÍ PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU .....</b>	<b>45</b>
<b>PŘÍLOHA B – ORIGINÁLNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZÍSKANÉ Z OBVODOVÉHO</b>	
<b>ANALYZÁTORU AGILENT 4395A .....</b>	<b>50</b>



## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1: Modulové charakteristiky kmitočtových filtrů typu (a) dolní propust (DP), (b) horní propust (HP), (c) pásmová zádrž (PZ), (d) pásmová propust (PP) .....	14
Obr. 2.1: Obecný dvojbran, znázornění proudů dle konvence .....	17
Obr. 2.2: Obecný dvojbran, znázornění proudů proti konvenci .....	17
Obr. 3.1: Diferenční napěťový přenos .....	18
Obr. 3.2: Diferenční proudový přenos .....	18
Obr. 3.3: Diferenční napěťový přenos s připojeným zdrojem napětí .....	19
Obr. 3.4: Diferenční proudový přenos s připojeným zdrojem proudu .....	19
Obr. 4.1: Transformace podélných struktur na diferenční [6] .....	22
Obr. 4.2: Příklady transformace podélných struktur na diferenční .....	22
Obr. 4.3: Transformace příčných struktur na diferenční [6] .....	22
Obr. 4.4: Příklad transformace příčných struktur s aktivním prvkem .....	23
Obr. 4.5: Ukázka nediferenčního vstupu .....	24
Obr. 4.6: Ukázka nediferenčního vstupu s využitím proudového konveje DVCC .....	24
Obr. 4.7: Ukázka a) nediferenčního výstupu, b) diferenčního výstupu s využitím napěťového invertoru .....	25
Obr. 4.8: Ukázka diferenčního výstupu s využitím proudového konveje DVCC .....	25
Obr. 5.1: CCII - schématická značka .....	26
Obr. 5.2: Schématická značka za a) DVCC, b) DDCC .....	26
Obr. 5.3: Schématická značka UCC .....	27
Obr. 5.4: Vnitřní schéma UCC .....	28
Tab. 5.5: Proudové konvejory s jednoduchým vstupem realizované pomocí UCC .....	29
Tab. 5.6: Proudové konvejory s diferenčním vstupem .....	29
Obr. 6.1: Návrh pseudo-diferenčního zapojení s filtrem dolní propust čtvrtého řádu .....	30
Obr. 6.2 :Modulová charakteristika filtru dolní propust čtvrtého řádu .....	32

Obr 7.1 Schéma zapojení při experimentálním měření	33
Obr. 7.2: Modulová charakteristika filtru dolní propust čtvrtého řádu	34
Obr. 7.3: Modulová charakteristika filtru při snížení napájecího napětí o 9%	35
Obr. 7.4: Schopnost pseudo-diferenčního filtru potlačit souhlasný signál	36
Obr. 7.5: Fázová charakteristika filtru dolní propust čtvrtého řádu	36
Obr. 7.6: Fázová charakteristika filtru při snížení napájecího napětí o 9%	37
Obr. 7.7: Harmonické zkreslení filtru	38
Obr. A.0.1: Schéma pseudo-diferenčního filtru	45
Obr. A.0.2: Návrh desky plošných spojů ze shora	47
Obr. A.0.3: Návrh desky plošných spojů ze zdola	47
Obr. A.0.4: Návrh desky plošných spojů (součástky)	48
Obr. A.0.5: Fotografie pseudo-diferenčního filtru pohled ze shora	48
Obr. A.0.6: Fotografie pseudo-diferenčního filtru pohled ze zdola	49
Obr. B.0.1: Originální výsledek modulové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení $\pm 1.65\text{ V}$	50
Obr. B.0.2: Originální výsledek modulové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení $\pm 1.50\text{ V}$	51
Obr. B.0.3: Originální výsledek fázové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení $\pm 1.65\text{ V}$	51
Obr. B.0.4: Originální výsledek fázové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení $\pm 1.50\text{ V}$	52
Obrázek B.0.6: Ukázka z měření harmonického zkreslení	52

# Úvod

Tato práce se zabývá pseudo-diferenčními kmitočtovými filtry vyššího řádu pracující v napěťovém režimu. Práce se zaměřuje na základy kmitočtových filtrů typy (HP, DP, PP, PZ a FČ) a jejich využití. Následuje popis diferenčních a pseudo-diferenčních přenosů a s názornými ukázkami transformací. Další část obsahuje popis použitých aktivních prvků (konvektorů) v navržených strukturách (CCII, DVCC, DDCC, UCC). V poslední části se práce věnuje vlastnímu návrhu pseudo-diferenčního filtru, experimentálnímu měření a porovnání výsledků měření z teorií.

Poslední dobou se nacházejí kmitočtové filtry v mnoha technických oborech, ať už v oblastech elektrotechniky nebo elektroniky. Využití nacházejí při selekci procházejícího signálu podle kmitočtu. Velký zájem je pak o diferenční, které mají oproti nediferenčním filtrům několik výhod. Ať už se jedná o schopnost potlačení souhlasného signálu, snižují harmonické zkreslení či kladně ovlivňují kvalitu signálu. Avšak nedílnou součástí je i jejich největší nevýhoda, která spočívá ve větším počtu aktivních a pasivních prvků. Čímž se obvod stane složitější, stoupne jeho cena a s větším počtem aktivních prvků vzroste i spotřeba elektrické energie. Pokud pro vytvoření plně diferenčního obvodu z nesymetrické struktury využijeme jednu z transformací, tedy zrcadlení. Počet aktivních a pasivních prvků se zvětší na téměř dvojnásobek.

Proto vznikly kmitočtové filtry pseudo-diferenční, které umožňují ponechat si výhody diferenčních zapojení. Jako je potlačení souhlasné složky atd.. Tak i výhodou obvodů nesymetrických, která spočívá v jejich jednodušším návrhu. Pseudo-diferenční filtry tedy spojují vlastnosti, či parametry jak z filtrů symetrických, tak i nesymetrických.

# 1 KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody [3]. Tyto filtry se využívají v mnoha odvětvích elektroniky, elektrotechniky, analogové techniky a dalších. Jejich hlavním úkolem je selekce procházejícího signálu podle kmitočtu. Filtrací se dosahuje úpravy spektra signálu podle požadavku potřebné aplikace. Principem filtrů je, že některé kmitočtové složky propouštějí bez útlumu (propustné pásmo) a některé kmitočtové složky potlačuje (nepropustné pásmo, případně pásmo útlumu).

S těmito filtry se dnes můžeme setkat v mnoha systémech i obvodech, a patří mezi základní stavební bloky pro zpracovávání přijímaných signálů. Využití pásmové propusti jako pro výběr přijímaných signálů, dolní a horní propusti jako kmitočtové výhybky a pásmových zádrží pro potlačení rušících signálů [3].

Kmitočtové filtry lze rozdělit do dvou skupin. Jsou to filtry s aktivními a pasivními obvodovými strukturami. Pasivní filtry jsou tvořeny rezistory, kapacitorem a induktorem. V dnešní moderní době je stále větší snahou nahrazovat pasivní filtry aktivními (napětovými a proudovými konvejory, případně operačními zesilovači). Aktivní filtr je tvořen aktivním prvkem, který je obohacen o pasivní prvky (rezistory a kapacitorem).

## 1.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ FILTRŮ

Jednotlivé kmitočtové filtry lze dělit do několika skupin. Jak již bylo zmíněno, na filtry pasivní nebo aktivní. Dále na filtry pseudo-diferenční (diferenční) a nediferenční. V neposlední řadě podle toho jaká je jejich propustnost, na filtry selektivní. Těmto filtrům bude věnována následující podkapitola.

## 1.2 SELEKTIVNÍ FILTRY

Úkolem selektivních filtrů je potlačení signálu v nepropustném pásmu. Filtry rozdělujeme podle toho, kde se nachází pásmo, ve kterém je signál propouštěn. Dělení je následující: dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmová zádrž (PZ), pásmová propust (PP) a fázovací člen (FČ). Každý filtr rozlišuje tzv. řád filtru. U pasivních filtrů odpovídá řád filtru počtu akumulacích prvků použitých v obvodu (kapacitor či induktor), které ovlivňují přenosové vlastnosti filtru. Obecně platí, že čím vyšší řád filtru, tím je větší strmost přechodu z propustného pásma do pásma nepropustného. Pro kmitočtové filtry vyššího řádu platí, že u každého lichého řádu, tedy 3. řádu, 5. řádu atd.. Nelze vytvořit filtr typu pásmové zádrže a pásmové propusti. Pro každý sudý řád, tedy 4. řád, 6. řád atd. lze vytvořit všechny typy

selektivních filtrů. Demonstrace je ukázána na příkladech 3. a 4. řádu u jednotlivých druhů přenosových funkcí v následujících podkapitolách 1.2.1 – 1.2.5..

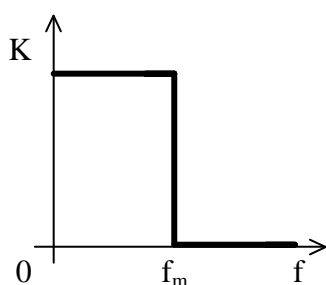
### 1.2.1 FILTR TYPU DOLNÍ PROPUST

Filtr dolní propust (DP) anglicky Low-Pass filter (LP), je filtr, který propouští nižší kmitočty než mezní  $f_m$  a vyšší kmitočty potlačuje (obr. 1.1(a)) [3], [4]. Využití především v audiotechnice a jako antialiasinový filtr.

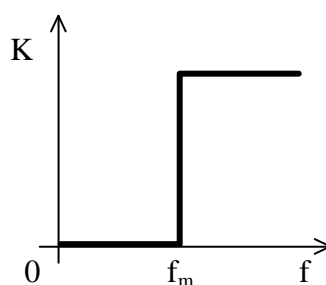
Přenosová funkce pro filtr DP 2. řádu [3]: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2} \quad (1.1)$$

Přenosová funkce pro filtr DP 3. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3} \quad (1.2)$$

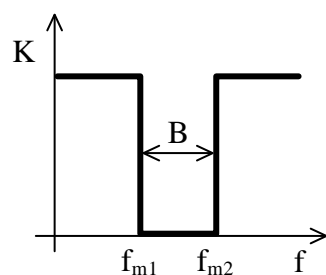
Přenosová funkce pro filtr DP 4. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4} \quad (1.3)$$



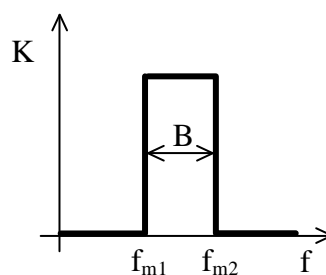
(a)



(b)



(c)



(d)

Obr. 1.1: Modulové charakteristiky kmitočtových filtrů typu (a) dolní propust (DP), (b) horní propust (HP), (c) pásmová zadrž (PZ), (d) pásmová propust (PP)

### 1.2.2 FILTR TYPU HORNÍ PROPUST

Filtr horní propust (HP), anglicky High-Pass filter (HP), je filtr, který propouští vyšší kmitočty než mezní  $f_m$ , nižší kmitočty potlačuje (obr. 1.1(b)) [3], [4]. Využití opět v audiotechnice.

Přenosová funkce pro filtr HP 2. řádu [3]: 
$$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2} \quad (1.4)$$

Přenosová funkce pro filtr HP 3. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_3 p^3}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3} \quad (1.5)$$

Přenosová funkce pro filtr HP 4. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_4 p^4}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4} \quad (1.6)$$

### 1.2.3 FILTR TYPU PÁSMOVÁ ZÁDRŽ

Filtr typu pásmová zádrž (PZ), anglicky Band-Reject filter (BR), je filtr, který nepropouští vybranou část spektra mezi dolním mezním  $f_{m1}$  a horním mezním  $f_{m2}$  kmitočtem, zbývající kmitočty propouští (obr. 1.1(c)) [3]. Využití v audiotechnice proti nežádoucí zpětné vazbě a pro blokování nechtěných frekvencí.

Přenosová funkce pro filtr PZ 2. řádu [3]: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0 + a_2 p^2}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2} \quad (1.7)$$

U filtru typu pásmová zádrž 3. řádu se přenosová funkce nenachází. Vyskytuje se až u 4. řádu.

Přenosová funkce pro filtr PZ 4. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0 + 2a_2 p^2 + a_4 p^4}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4} \quad (1.8)$$

### 1.2.4 FILTR TYPU PÁSMOVÁ PROPUST

Filtr typu pásmová propust (PP), anglicky Band-Pass filter (BP), je filtr, který propouští vybranou část spektra mezi dolním mezním  $f_{m1}$  a horním mezním  $f_{m2}$  kmitočtem, zbývající kmitočty potlačuje (obr. 1.1(d)) [3]. Využití jako generátor sinusového napětí.

Přenosová funkce pro filtr PP 2. řádu [3]: 
$$K(p) = \frac{a_1 p^1}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2} \quad (1.9)$$

U filtru typu pásmová propust 3. řádu se přenosová funkce nenachází. Vyskytuje se až u 4. řádu.

Přenosová funkce pro filtr PP 4. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4} \quad (1.10)$$

### 1.2.5 FILTR TYPU FÁZOVACÍ ČLÁNEK

Filtr typu fázovací článek (FČ), anglicky All-Pass filter (AP), je filtr, u kterého je modulová charakteristika v celém kmitočtovém pásmu konstantní a fázová je kmitočtově závislá.

Přenosová funkce pro filtr FČ 2. řádu [3]: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0 - a_1 p^1 + a_2 p^2}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2} \quad (1.11)$$

Přenosová funkce pro filtr FČ 3. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0 - a_1 p^1 + a_2 p^2 - a_3 p^3}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3} \quad (1.12)$$

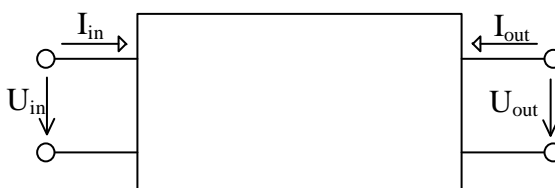
Přenosová funkce pro filtr FČ 4. řádu: 
$$K(p) = \frac{a_0 p^0 - a_1 p^1 + a_2 p^2 - a_3 p^3 + a_4 p^4}{b_0 p^0 + b_1 p^1 + b_2 p^2 + b_3 p^3 + a_4 p^4} \quad (1.13)$$

## 2 DEFINICE NEDIFERENČNÍCH PŘENOSŮ

Kmitočtový filtr si lze představit jako jednoduchý lineární dvojbran [3], který je zobrazen na Obr. 2.1. Z níže uvedených rovnic vyplývá, že napěťový přenos  $K_u$  můžeme vyjádřit jako podíl výstupního napětí a vstupního napětí (2.1). Proudový přenos potom lze vyjádřit jako podíl výstupního proudu a vstupního proudu vynásobený hodnotou -1 (2.2) [3]. Tyto rovnice platí pouze pro případ znázorněný na Obr. 2.1.

$$K_u = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (2.1)$$

$$K_i = \frac{-I_{out}}{I_{in}} \quad (2.2)$$



Obr. 2.1: Obecný dvojbran, znázornění proudů dle konvence

Výstupní proud  $I_{out}$  je standardně kreslen šipkou směrem dovnitř, jak je uvedeno na Obr. 2.1, ale v rovnici (2.2) je znaménko mínus. To znamená, že proud tedy teče opačným směrem, přesněji do dalšího bloku.

Je snaha předejít situaci aby u výstupního proudu nemuselo být znaménko mínus, nebo zaznačen popisek s opačnou fází. Proto se směr výstupního proudu otočí, jak je znázorněno na Obr. 2.2. Potom se výsledného přenosu proudu změní znaménko (2.3), napěťový přenos zůstává nezměněn. S touto technikou se můžeme setkat v mnohé literatuře [7].

$$K_i = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (2.3)$$



Obr. 2.2: Obecný dvojbran, znázornění proudů proti konvenci

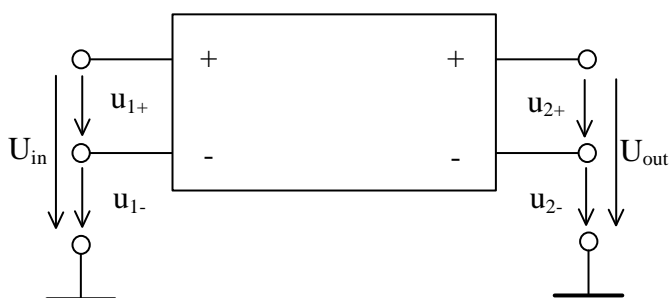


### 3 DEFINICE PSEUDO-DIFERENČNÍCH PŘENOSŮ

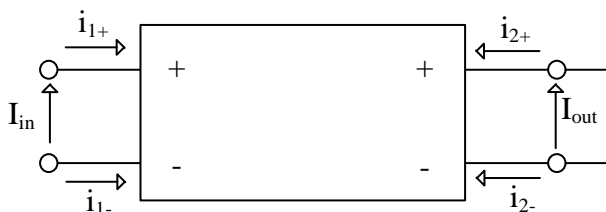
Pseudo-diferenční filtry spojují kladné vlastnosti nediferenčních filtrů - jednoduchost zapojení, a plně diferencních filtrů – dynamický rozsah, potlačení souhlasného signálu, kvalitu signálu a harmonické zkreslení [9].

Pseudo-diferenční napěťový přenos je charakterizován obdobně jako u nediferenčního přenosu, a to podílem výstupního pseudo-diferenčního napětí a vstupního pseudo-diferenčního napětí Obr. 3.1 a vztah (3.5).

Pseudo-diferenční proudový přenos je definován jako podíl pseudo-diferenčního výstupního a pseudo-diferenčního vstupního proudu vynásobený hodnotou (-1). Platí pro případ znázorněný na Obr. 3.2 a vztah (3.6).



Obr. 3.1: Diferenční napěťový přenos



Obr. 3.2: Diferenční proudový přenos

Pokud uvážíme tyto rovnice

$$U_{in} = u_{1+} - u_{1-} \quad (3.1)$$

$$U_{out} = u_{2+} - u_{2-} \quad (3.2)$$

$$I_{in} = i_{1+} - i_{1-} \quad (3.3)$$

$$I_{out} = i_{2+} - i_{2-} \quad (3.4)$$

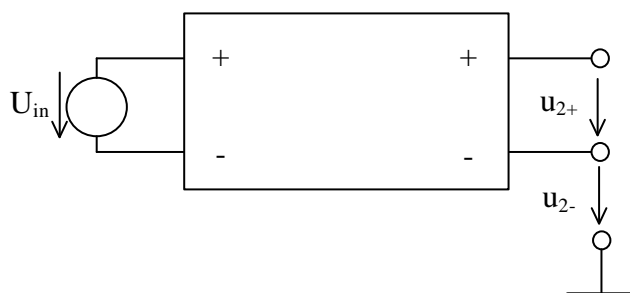
Ize vyjádřit vstupní a výstupní diferenční napětí a proud následovně:

$$K_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}} \quad (3.5)$$

$$K_I = -\frac{I_{out}}{I_{in}} = -\frac{i_{2+} - i_{2-}}{i_{1+} - i_{1-}} \quad (3.6)$$

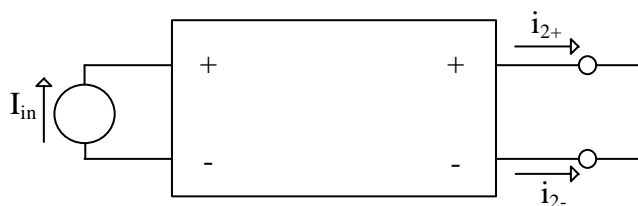
Jestliže budeme respektovat to, že se signál šíří od vstupu na výstup obvodu, stejně jako u nediferenčního přenosu, i to že na vstupy bude připojen napěťový zdroj  $U_{in}$ , tak jak je znázorněno na Obr. 3.3 a na rovnici (3.7). Získáme tak vstupní napětí  $2U_{in}$ , díky tomu lze odvodit vztah pro diferenční napěťový přenos. Diferenční proudový přenos se zdrojem proudu znázorňuje Obr. 3.4 a vztah (3.8).

$$K_U = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{2U_{in}} \quad (3.7)$$



Obr. 3.3: Diferenční napěťový přenos s připojeným zdrojem napětí

$$K_I = \frac{i_{2+} - i_{2-}}{2I_{in}} \quad (3.8)$$



Obr. 3.4: Diferenční proudový přenos s připojeným zdrojem proudu

### 3.1 ZOBRAZENÍ SOUHLASNÉHO SIGNÁLU – CMRR

CMRR, ang. Common-mode rejection ratio, určuje jak je pseudo-diferenční filtr schopný potlačit nežádoucí souhlasný signál. Ideálně by mělo být CMRR nekonečno, to ale v praxi není možné. CMRR je dáno vztahem:

$$CMRR = 20 \times \log \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right| \quad (3.9)$$

Při analýze diferenčních obvodů v napěťovém režimu můžeme uvažovat tyto rovnice

$$U_{in} = u_{1+} - u_{1-} \quad (3.10)$$

$$U_{out} = u_{2+} - u_{2-} \quad (3.11)$$

$$U_c = \frac{u_{1+} + u_{1-}}{2} \quad (3.12)$$

kde,  $U_{in}$  značí vstupní diferenční napětí,  $U_{out}$  výstupní diferenční napětí a  $U_c$  je vstupní souhlasné napětí. Z výše uvedených rovnic je tedy jasné, že  $U_{in}$  je rozdíl mezi vstupními signály, zatímco  $U_c$  je souhlasný vstupní signál definován jako průměr vstupních signálů  $u_{1+}$  a  $u_{1-}$ . [6], [11]. Pseudo-diferenční je definováno takto:

$$U_{out} = U_{in} \times A_{dm} + U_c \times A_{cm} \quad (3.13)$$

kde,  $A_{dm}$  je pseudo-diferenční zesílení a  $A_{cm}$  je zesílení souhlasného signálu.

### 3.2 ZOBRAZENÍ POTLAČENÍ NEŽÁDOUCÍHO NAPÁJECÍHO SIGNÁLU – PSRR

PSRR, ang. Power supply rejection ratio, hodnotu nežádoucího šumu od zdroje, jakou je filtr schopný potlačit. . Ideálně by mělo být PSRR nekonečno, to ale v praxi není možné. PSRR je dáno vztahem:

$$PSRR = 20 \log \frac{\Delta U_{supply}}{\Delta U_{out}} \quad (3.14)$$

kde  $\Delta U_{supply}$  je změna napájecího napětí a  $\Delta U_{out}$  změna výstupního napětí [15].

## 4 PLNĚ DIFERENČNÍ FILTRY

V dnešní moderní době, je snaha využívat diferenční struktury čím dál více, oproti těm nediferenčním. Důvodem je to, že nabízení mnoho výhod. Zlepšují kvalitu signálu, zvyšují dynamický rozsah, procento potlačení souhlasného signálu, omezují efekty výkonového zesílení a v neposlední řadě snižují harmonické zkreslení signálu [6], [9].

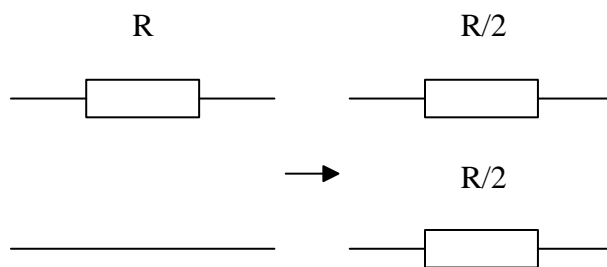
Kmitočtové diferenční filtry přinášejí ale i jednu nevýhodu. Ta spočívá v tom, že je k návrhu diferenčního obvodu zapotřebí dvojnásobek prvků, jak pasivních, tak i aktivních. V důsledku toho se stává obvod složitější, návrh je komplikovanější.

Diferenční filtry jsou součástí telefonních nebo mobilních zařízení. Plní funkci filtru, který filtruje signál na symetrickém vedení. Odděluje datový signál od telefonního.

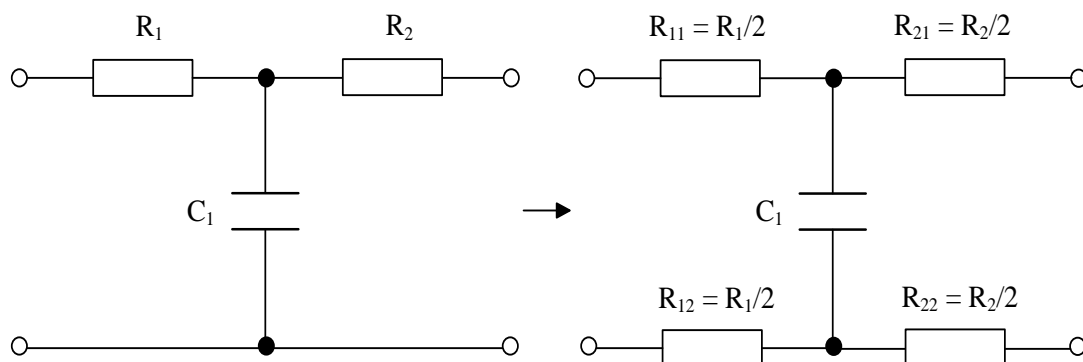
Mezi nejjednodušší a nejběžnější příklady návrhu diferenčního filtru patří transformace nediferenčního filtru na diferenční. To lze dosáhnout pomocí takzvaného zrcadlení obvodu, kdy zrcadlíme všechny pasivní součástky, které se nacházejí okolo aktivního prvku [10]. Aktivní prvky lze buďto nahradit za jejich diferenční ekvivalenty s diferenčními vstupy a výstupy, nebo je lze taktéž zrcadlit a zvýšit jejich počet o dvojnásobek. Při této metodě je nutné určit hodnoty pasivních součástek po jejich zrcadlení, podle toho jaká metoda zrcadlení je použita. Lze zvolit mezi dvěma metodami, které budou popsány v následujících dvou kapitolách.

### 4.1 TRANSFORMACE PODÉLNÝCH STRUKTUR

Transformace pasivních podélných struktur na diferenční [10] je založena, jak již název napovídá na tom, že zrcadlíme pouze hodnoty těch prvků, které se nacházejí v podélné větvi. Prvky nacházející se na příčné větvi neměníme. Na Obr. 4.1 můžeme vidět, že každý rezistor v podélné větvi je transformován na dva a jeho hodnota se sníží na polovinu oproti původnímu. U kapacitorů je situace stejná s tím rozdílem, že se hodnota v podélných větvích zvětší na dvojnásobnou. Příklad realizace transformace pomocí podélných struktur je znázorněn na Obr. 4.2 [6], [8].



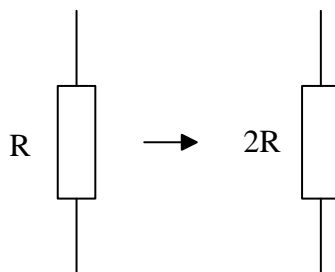
Obr. 4.1: Transformace podélných struktur na diferenční [6]



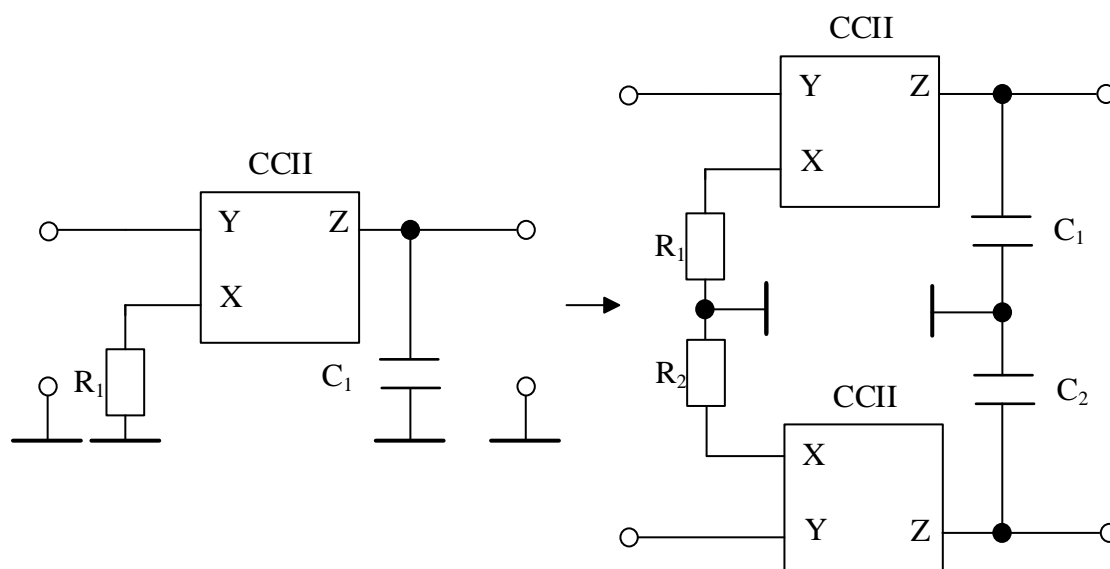
Obr. 4.2: Příklad transformace podélných struktur na diferenční

## 4.2 TRANSFORMACE PŘÍČNÝCH STUKTUR

U transformace pasivních příčných struktur na diferenční provádíme zrcadlení nediferenční struktury vůči zemi a měníme hodnoty pouze těch prvků v příčné větvi, opačně jako u předchozího případu. Hodnoty prvků v podélných větvích zůstanou beze změny. Příklad realizace transformace pomocí příčných struktur je znázorněn na Obr. 4.3 a Obr. 4.4 [6], [8].



Obr. 4.3: Transformace příčných struktur na diferenční [6]



Obr. 4.4: Příklad transformace příčných struktur s aktivním prvkem

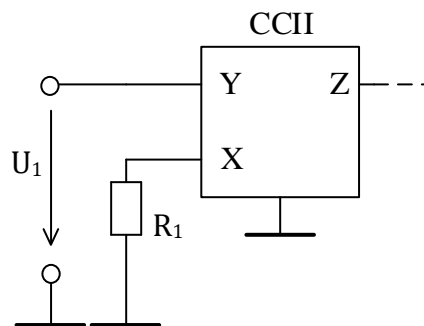
### 4.3 TRANSFORMACE NESYMETRICKÝCH FILTRŮ NA PSEUDO-DIFERENČNÍ

Pokud vezmeme v úvahu vstupní i výstupní signály (3.9) – (3.11), lze zrealizovat pseudo-diferenční kmitočtový filtr, u kterého můžeme definovat vstupní a výstupní diferenční parametry, s tím že jeho struktura neznázorňuje plně diferenční řešení.

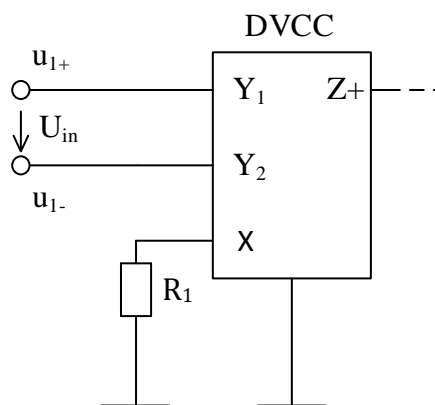
Tyto bloky zaručují potřebně velké potlačení souhlasného napětí a jejich obvodová struktura je méně složitější v porovnání s plně diferenční kmitočtovými filtry.

#### 4.3.1 TRANSFORMACE NEDIFERENČNÍHO VSTUPU NA VSTUP DIFERENČNÍ V NAPĚŤOVÉM REŽIMU

K modifikaci nediferenčního vstupu na diferenční je vhodné, aby byl vstupní signál přiveden přímo do aktivního prvku, přesněji na jeho napěťovou bránu  $Y$ . Jako příklad této transformace byl vybrán jednoduchý proudový konvektor druhé generace CCII Obr. 4.5. K možnosti modifikovat vstup na symetrický je třeba zvolit aktivní prvek, který má vstupní svorky rozdílové. Na obr. 4.6 můžeme vidět, že vstupní signál je přiveden přímo vstupní svorky  $Y_1$  a  $Y_2$ , díky čemu je nežádoucí rušení odstraněno a dále prochází pouze rozdíl signálu. Pro ukázkou transformace byl zvolen aktivní prvek DVCC [1], [2], [6], [8], [11].



Obr. 4.5: Ukázka nediferenčního vstupu

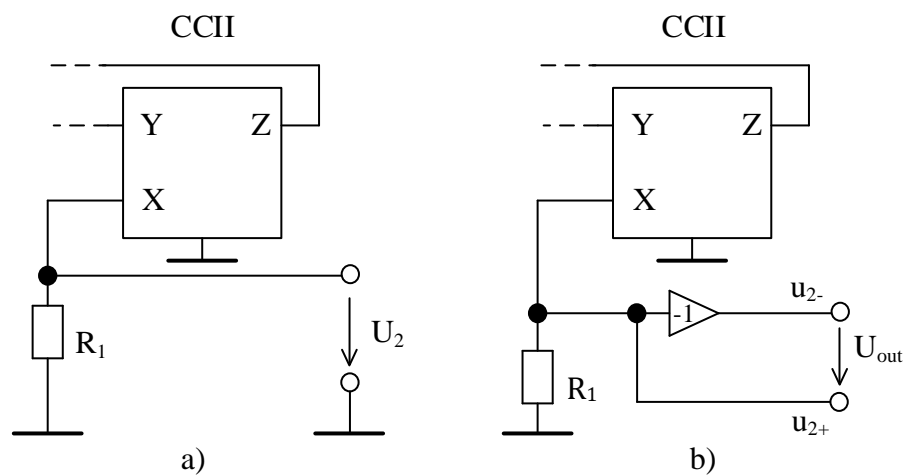


Obr. 4.6: Ukázka nediferenčního vstupu s využitím proudového konveje DVCC

#### 4.3.2 TRANSFORMACE NEDIFERENČNÍHO VÝSTUPU NA VÝSTUP DIFERENČNÍ V NAPĚŤOVÉM REŽIMU

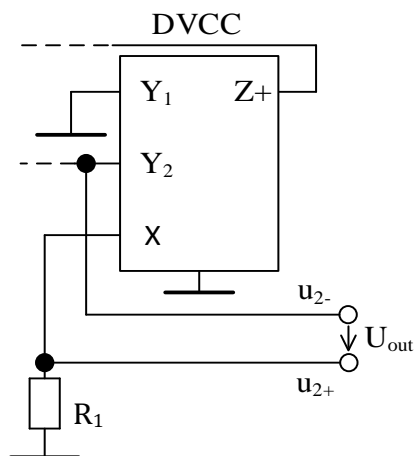
K modifikaci nediferenčního výstupu na diferenční je třeba doplnit výstupovou svorku o napěťový invertor Obr. 4.7b, tento způsob je nejrychlejší. Tato informace vyplývá z předchozí teorie v kapitole 3.

Pro ukázkou na příkladu byl opět využit proudový konveje CCII Obr.4.7a, kde je zobrazena část obvodu a jeho nediferenční výstupní napětí.



Obr. 4.7: Ukázka a) nediferenčního výstupu, b) diferenčního výstupu s využitím napěťového invertoru

Pokud je třeba opět měřit napětí na bráně X, lze dosáhnout efektivnějšího řešení. Tím je zaměnění aktivního prvku CCII za proudový konvektor DVCC, který již obsahuje napěťový invertor. Celé zapojení se značně zjednoduší, viz Obr. 4.9 [1], [2], [6], [8], [6].

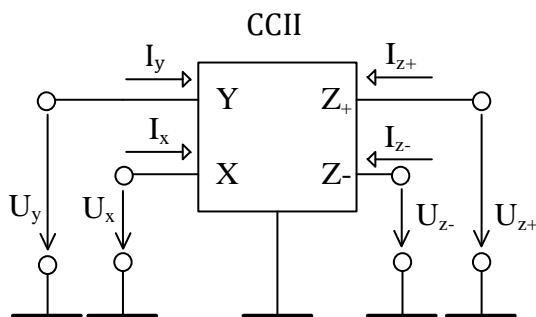


Obr. 4.8: Ukázka diferenčního výstupu s využitím proudového konvektoru DVCC



## 5 AKTIVNÍ PRVKY POUŽITÉ V NÁVRHU

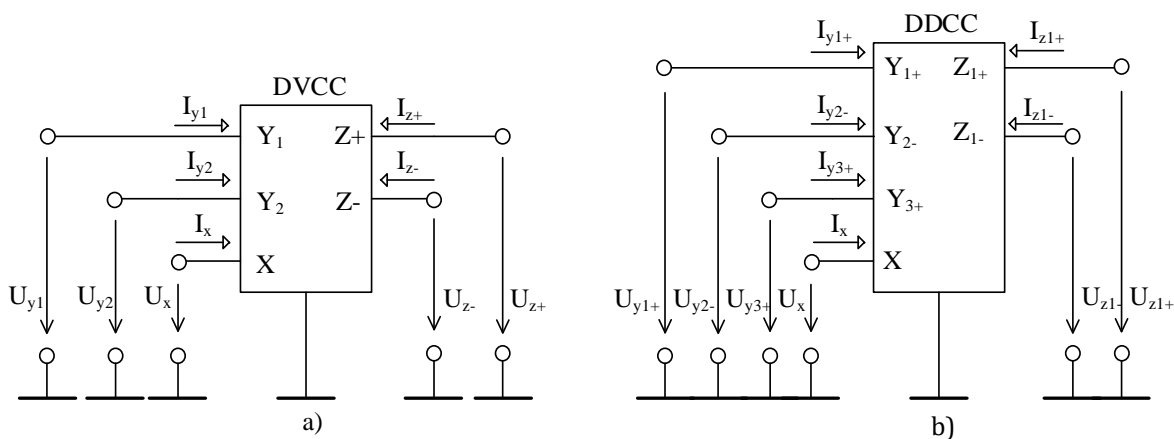
Proudový konvektor druhé generace (CCII) je aktivní prvek, který obsahuje dvě vstupní brány: jeden vysoko impedanční napětový vstup  $Y$ , jeden nízko impedanční vstup  $X$  a dále výstupy vysoko impedanční  $Z_+$  a  $Z_-$ . Jeho schématická značka je znázorněna na Obr. 5.1 a rovnice popisující vztahy mezi jednotlivými branami (5.1) [6], [8], [14].



Obr. 5.1: CCII - schématická značka

$$U_x = U_y, I_y = 0, I_{z+} = I_x, I_{z-} = -I_x \quad (5.1)$$

Diferenční proudový konvektor (DVCC) je aktivní prvek, který obsahuje tři vstupní brány, z toho dva vstupy vysoko impedančně napětové  $Y_1$  a  $Y_2$ , jeden nízko impedanční proudový  $X$  a dva vysoko impedanční proudové výstupy  $Z_+$  a  $Z_-$ . Na Obr. 5.2a je jeho schématická značka a rovnice popisující vztahy mezi vstupy a výstupy (5.2) [6], [8].



Obr. 5.2: Schématická značka za a) DVCC, b) DDCC

Diferenční rozdílový proudový konvektor (DDCC) je aktivní prvek, který obsahuje čtyři vstupy, z toho jsou tři vysoko impedančně napětové  $Y_{1+}$ ,  $Y_{2-}$  a  $Y_{3+}$ , jeden nízko impedanční

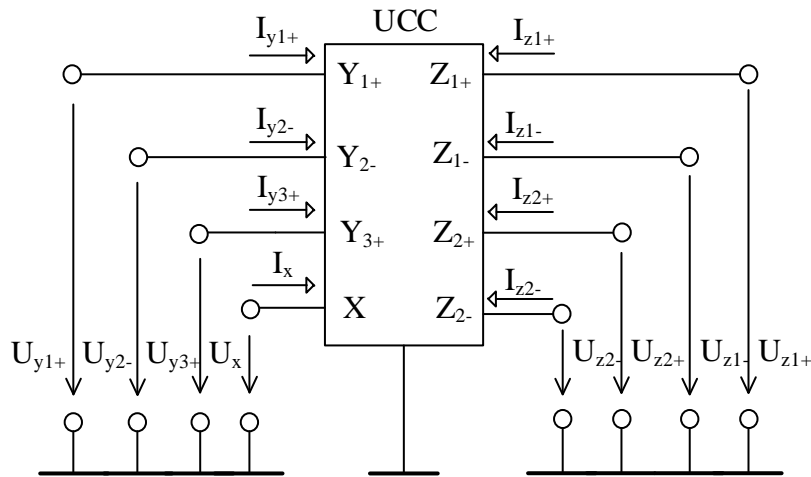
proudový  $X$  a dva vysoko impedanční proudové výstupy  $Z_{1+}$  a  $Z_{1-}$ . Jeho schématická značka je znázorněna na Obr. 5.2b a rovnice popisující spojitost mezi jednotlivými svorkami (5.3) [6], [14].

$$U_x = U_{y1} - U_{y2}, I_{y1} = I_{y2} = 0, I_{z+} = I_x, I_{z-} = -I_x \quad (5.2)$$

$$U_x = U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+}, I_{y1} = I_{y2-} = I_{y3} = 0, I_{z+} = I_x, I_{z-} = -I_x \quad (5.3)$$

Díky tomu, že šla technika čím dál více kupředu, začalo se objevovat velké množství konvektorů a orientace se v nich byla obtížná, byl vytvořen Univerzální proudový konvektor (UCC) pomocí jeho lze realizovat všechny existující konvektory. Univerzální proudový konvektor definujeme jako obecný osmibran, který má tři vysoko impedanční napěťové vstupy  $Y_{1+}$ ,  $Y_{2-}$  a  $Y_{3+}$ , jeden nízko impedanční vstup  $X$  a čtyři proudové výstupy  $Z_{1+}$ ,  $Z_{1-}$ ,  $Z_{2+}$ ,  $Z_{2-}$  [14].

Jak již bylo zmíněno výše, všechny známé konvektory lze realizovat pomocí UCC tak, že propojíme potřebné svorky a nevyužité uzemníme. Na Obr. 5.3 vidíme schématickou značku.



Obr. 5.3: Schématická značka UCC

Vztahy mezi vstupy a výstupy univerzálního proudového konvektoru můžeme popsat pomocí těchto rovnic [4]:

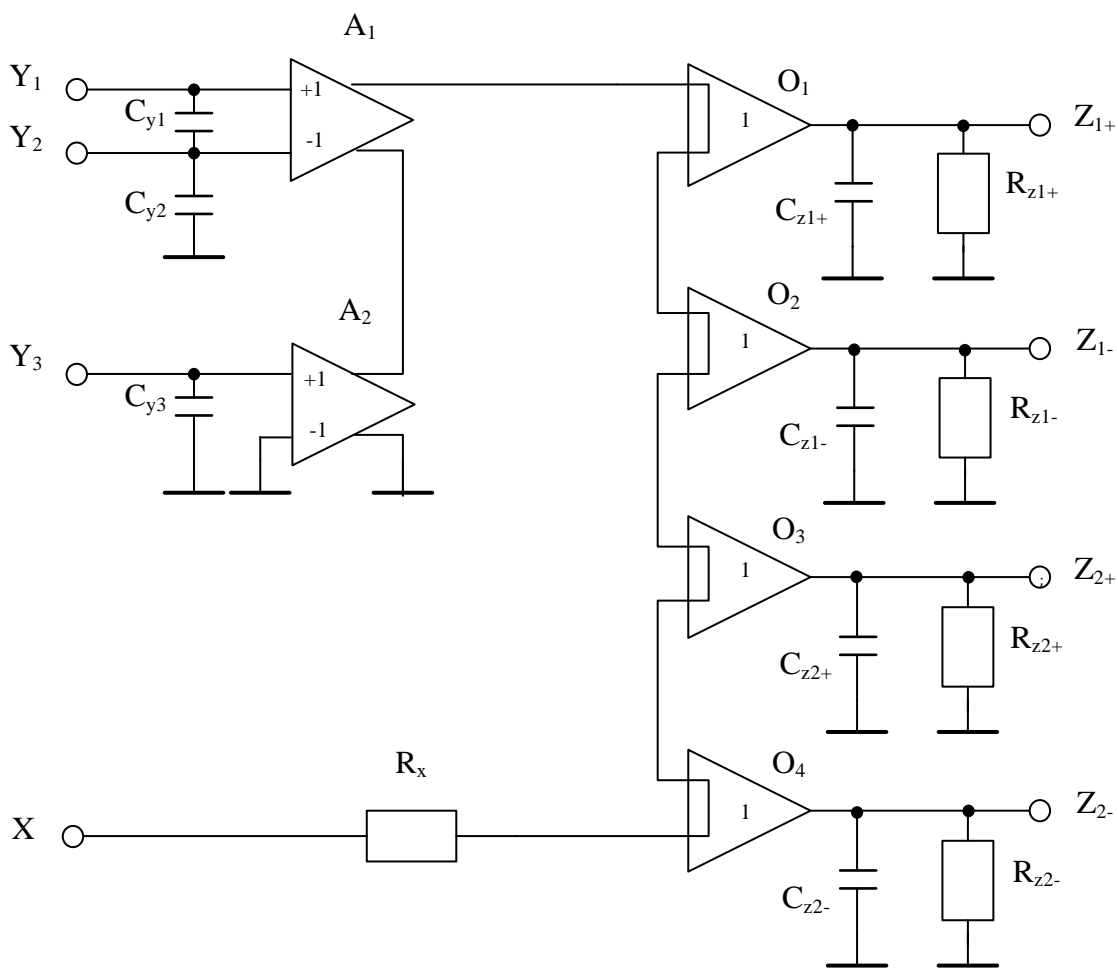
$$I_{z1+} = I_{z2+} = I_x \quad (5.4)$$

$$I_{z1-} = I_{z2-} = -I_x \quad (5.5)$$

$$I_{y1+} = I_{y2-} = I_{y3} = 0 \quad (5.6)$$

$$U_x = U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+} \quad (5.7)$$

Na Obr 5.4 je naznačen jednoduchý vnitřní model univerzálního proudového konvektoru. Model se skládá ze čtyř proudových sledovačů  $O_1$  až  $O_4$  a dvou rozdílových napěťových sledovačů [14].



Obr. 5.4: Vnitřní schéma UCC

Rovnice (5.8) vyjadřuje maticový popis univerzálního proudového zdroje UCC.

$$\begin{bmatrix} I_{y1+} \\ I_{y2-} \\ I_{y3+} \\ U_x \\ I_{z1+} \\ I_{z2+} \\ I_{z1-} \\ I_{z2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{y1+} \\ U_{y2-} \\ U_{y3+} \\ I_x \\ U_{z1+} \\ U_{z2+} \\ U_{z1-} \\ U_{z2-} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

V Tab. 5.5 jsou znázorněny některé příklady typů proudových konvektorů s využitím jedním vstupem realizované pomocí UCC. V Tab. 5.6 jsou ukázány možné realizace proudových konvektorů s rozdílovým vysoko impedančním vstupem [14].

Tab. 5.5: Proudové konvejory s jednoduchým vstupem realizované pomocí UCC

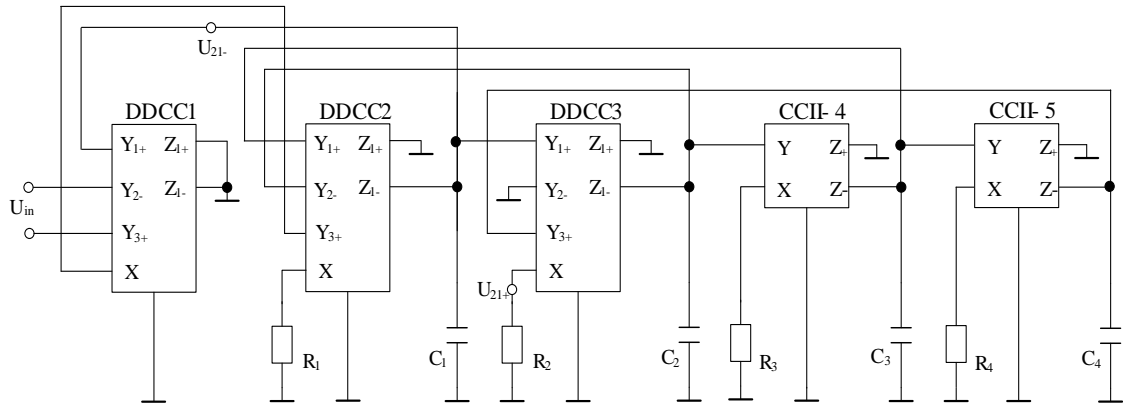
Typ	Vstup	Výstup	Propojení	Uzemnění
CCI-	$Y_{1+}$	$Z_{1-}$	$Y_{1+}, Z_{1+}$	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCI+	$Y_{1+}$	$Z_{2+}$	$Y_{1+}, Z_{1+}$	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{1-}, Z_{2-}$
CCI+/-	$Y_{1+}$	$Z_{2+}, Z_{1-}$	-	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{2-}$
CCII-	$Y_{1+}$	$Z_{1-}$	-	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCII+	$Y_{1+}$	$Z_{1+}$	-	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCII+/-	$Y_{1+}$	$Z_{1+}, Z_{1-}$	-	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$

Tab. 5.6: Proudové konvejory s diferenčním vstupem

Typ	Vstup	Výstup	Propojení	Uzemnění
DVCCI-	$Y_{1+}, Y_{2-}$	$Z_{1-}$	-	$Y_{3+}, Z_{2-}$
DVCC	$Y_{1+}, Y_{2-}$	$Z_{1+}, Z_{1-}$	-	$Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
DVCCIII	$Y_{1+}, Y_{2-}, Y_{3+}$	$Z_{1+}$	-	$Y_{3+}, Z_{2+}$
DDCC-	$Y_{1+}, Y_{2-}, Y_{3+}$	$Z_{1-}$	-	$Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
DDCC+	$Y_{1+}, Y_{2-}, Y_{3+}$	$Z_{1+}$	-	$Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$
DDCC+/-	$Y_{1+}, Y_{2-}, Y_{3+}$	$Z_{1+}, Z_{1-}$	-	$Z_{2+}, Z_{2-}$

## 6 VLASTNÍ NÁVRH PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU PRACUJÍCÍHO V NAPĚŤOVÉM REŽIMU

Návrh pseudo-diferenčního filtru čtvrtého řádu pracujícího v napěťovém režimu lze vidět na Obr. 6.1. Obvod je tvořen třemi diferenčními rozdílými proudovými konvejory DDCC a dvěma proudovými konvejory druhé generace CCII-. Dále jsou použity pasivní prvky, přesněji čtyři rezistory a čtyři kondenzátory, které jsou uzemněny.



Obr. 6.1: Návrh pseudo-diferenčního zapojení s filtrem dolní propust čtvrtého řádu

Tento filtr umožňuje realizovat zapojení s filtrem dolní propust čtvrtého řádu, podle (1.1) a (1.2). Pokud budeme uvažovat ideální aktivní prvky, bude na výstupních svorkách  $U_{21+}$  a  $U_{21-}$  napětí:

$$U_{21+} = \frac{-p^3 C_2 C_3 C_4 R_2 R_3 R_4}{p^4 C_1 C_2 C_3 C_4 R_1 R_2 R_3 R_4 + p^3 C_2 C_3 C_4 R_2 R_3 R_4 + p^2 C_3 C_4 R_3 R_4 + p(C_1 R_1 + C_4 R_4) + 1} \quad (6.1)$$

$$U_{21-} = \frac{-p^3 C_2 C_3 C_4 R_2 R_3 R_4 - 1}{p^4 C_1 C_2 C_3 C_4 R_1 R_2 R_3 R_4 + p^3 C_2 C_3 C_4 R_2 R_3 R_4 + p^2 C_3 C_4 R_3 R_4 + p(C_1 R_1 + C_4 R_4) + 1} \quad (6.2)$$

Pro diferenční výstupní napětí  $U_{out}$  podle (3.9) – (3.11) popisuje tato rovnice:

$$U_{out} = \frac{1}{p^4 C_1 C_2 C_3 C_4 R_1 R_2 R_3 R_4 + p^3 C_2 C_3 C_4 R_2 R_3 R_4 + p^2 C_3 C_4 R_3 R_4 + p(C_1 R_1 + C_4 R_4) + 1} \quad (6.3)$$

Pro výpočet hodnot rezistorů kmitočtového filtru čtvrtého řádu a následné simulace byly využity Butterworthovy koeficienty, popsány v Tab. 6.1 a Tab. 6.2

Tab. 6.1: Butterworthovy normalizované polynomy jmenovatele

Tabulka 1

n (řád)	polynom
1	$(1+s)$
2	$(1+1.414s+s^2)$
3	$(1+s)(1+s+s^2)$
4	$(1+0.765s+s^2)(1+1.848s+s^2)$
5	$(1+s)(1+0.618s+s^2)(1+1.618s+s^2)$
6	$(1+0.518s+s^2)(1+1.414s+s^2)(1+1.932s+s^2)$
7	$(1+s)(1+0.445s+s^2)(1+1.247s+s^2)(1+1.802s+s^2)$
8	$(1+0.390s+s^2)(1+1.111s+s^2)(1+1.663s+s^2)(1+1.962s+s^2)$
9	$(1+s)(1+0.347s+s^2)(1+s+s^2)(1+1.532s+s^2)(1+1.879s+s^2)$
10	$(1+0.313s+s^2)(1+0.908s+s^2)(1+1.414s+s^2)(1+1.782s+s^2)(1+1.975s+s^2)$

Tab. 6.2: Butterworthovy polynomy ve formě koeficientů

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$
1									
1	1,414								
1	2,000	2,000							
1	2,613	3,414	2,613						
1	3,236	5,236	5,236	3,236					
1	3,864	7,464	9,142	7,464	3,864				
1	4,494	10,098	14,592	14,592	10,980	4,494			
1	5,126	13,137	21,846	25,688	21,846	13,137	5,126		
1	5,759	16,582	31,163	41,986	41,986	31,163	16,582	5,759	
1	6,392	20,432	42,802	74,233	74,233	64,822	42,802	20,432	6,392

Následujícími rovnicemi jsou popsány přenosové funkce filtru:

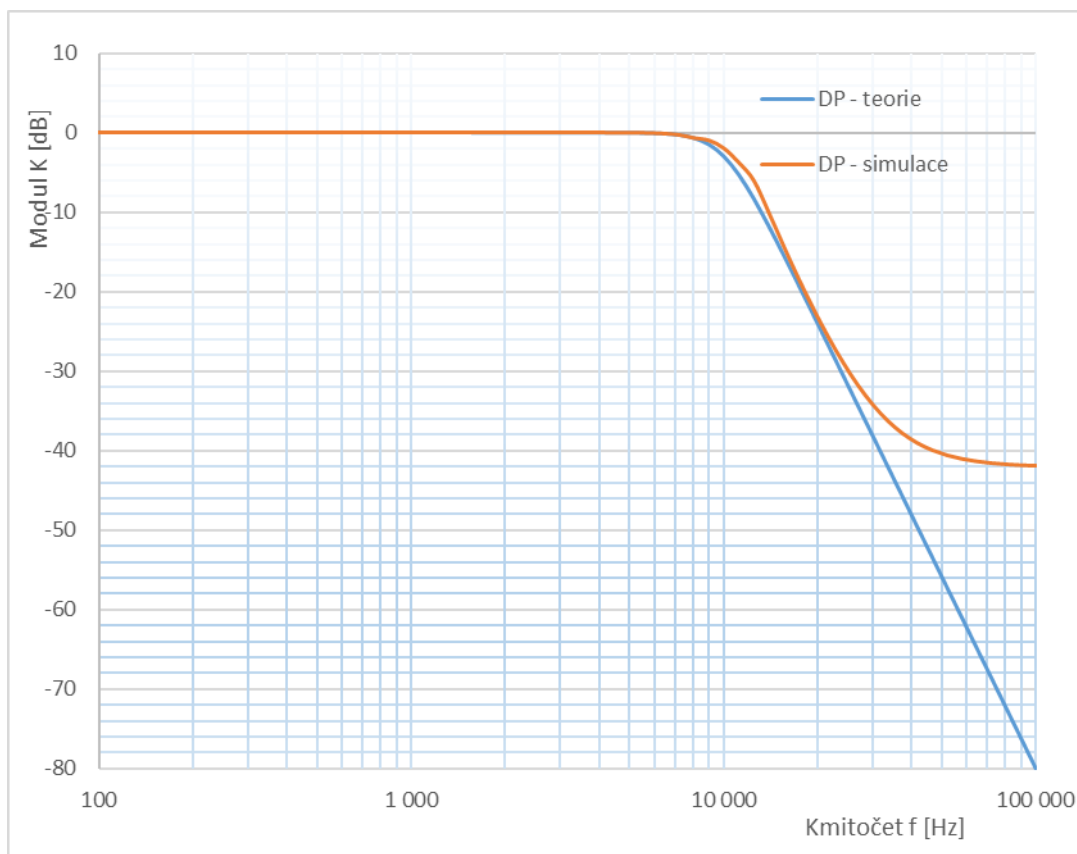
$$\omega_0^4 C^4 R_1 R_2 R_3 R_4 = 1 \quad (6.4)$$

$$\omega_0^3 C^3 R_2 R_3 R_4 = 2,613 \quad (6.5)$$

$$\omega_0^2 C^2 R_3 R_4 = 3,414 \quad (6.6)$$

$$\omega_0 C (R_1 + R_4) = 2,613 \quad (6.7)$$

Simulace obvodu byla provedena v programu OrCAD a zvoleny hodnoty: mezní kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$  a hodnoty kondenzátorů  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 10\text{nF}$ . Následně byly dopočítány hodnoty rezistorů z rovnic 6.4 – 6.7.  $R_1 = 609\Omega$ ,  $R_2 = 1219\Omega$ ,  $R_3 = 2437\Omega$  a  $R_4 = 3551\Omega$ . Pro simulaci v OrCADu byl použit univerzální proudový konvektor třetí generace (UCC-3L). Výsledek simulace lze vidět na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 :Modulová charakteristika filtru dolní propust čtvrtého řádu

Z charakteristik vyplývá, že mezi ideálním průběhem a simulací jsou drobné rozdíly. Tento filtr v simulačním měření nabývá útlumu cca -45 dB.

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE

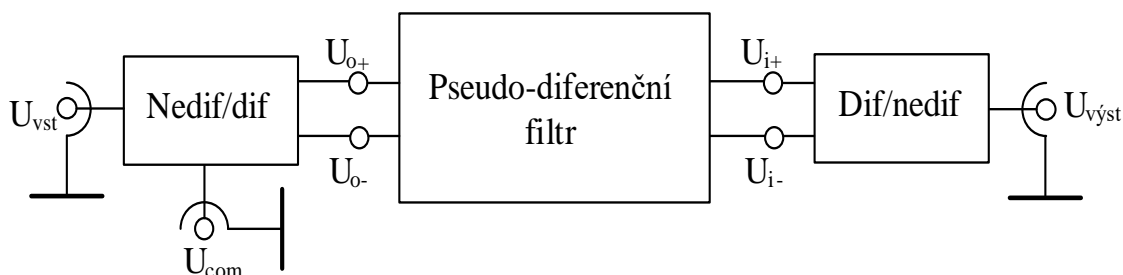
Cílem tohoto experimentálního měření bylo ověření chování pseudo-diferenčního filtru s reálnými součástkami a porovnání s teorií. Simulace obvodu byla vytvořena pomocí programu OrCAD, kde byl využit univerzální proudový konvektor třetí generace (UCC-3L).

V případě experimentálního měření byly použity tři univerzální proudové konvejory UCC-N1B [16]. Tento obvod byl zapojen, tak aby byl vytvořen diferenční rozdílový proudový konvektor DDCC, stejný obvod (jeho vnitřní blok) byl využitý jako proudový konvektor druhé generace CCII (viz kap. 5).

Deska plošného spoje byla navržena v programu Eagle verze 6.5.0, dokumentace k návrhu je v příloze A. Samotný návrh obsahuje i příložené CD.

Experimentální měření na obvodovém analyzátoru Agilent 4395A probíhalo v rozmezí 10 Hz až 100 kHz, šířka pásma byla 30 Hz a vstupní signál 0 dBm.

Na Obr. 7.1 je zakreslená bloková schéma, jak bylo celé měření zrealizováno. Kromě pseudo-diferenčního filtru bylo při experimentálním měření využito jednoho převodníku diferenčního napětí na nediferenční, a jednoho převodníku nediferenčního napětí na diferenční napětí.



Obr 7.1 Schéma zapojení při experimentálním měřením

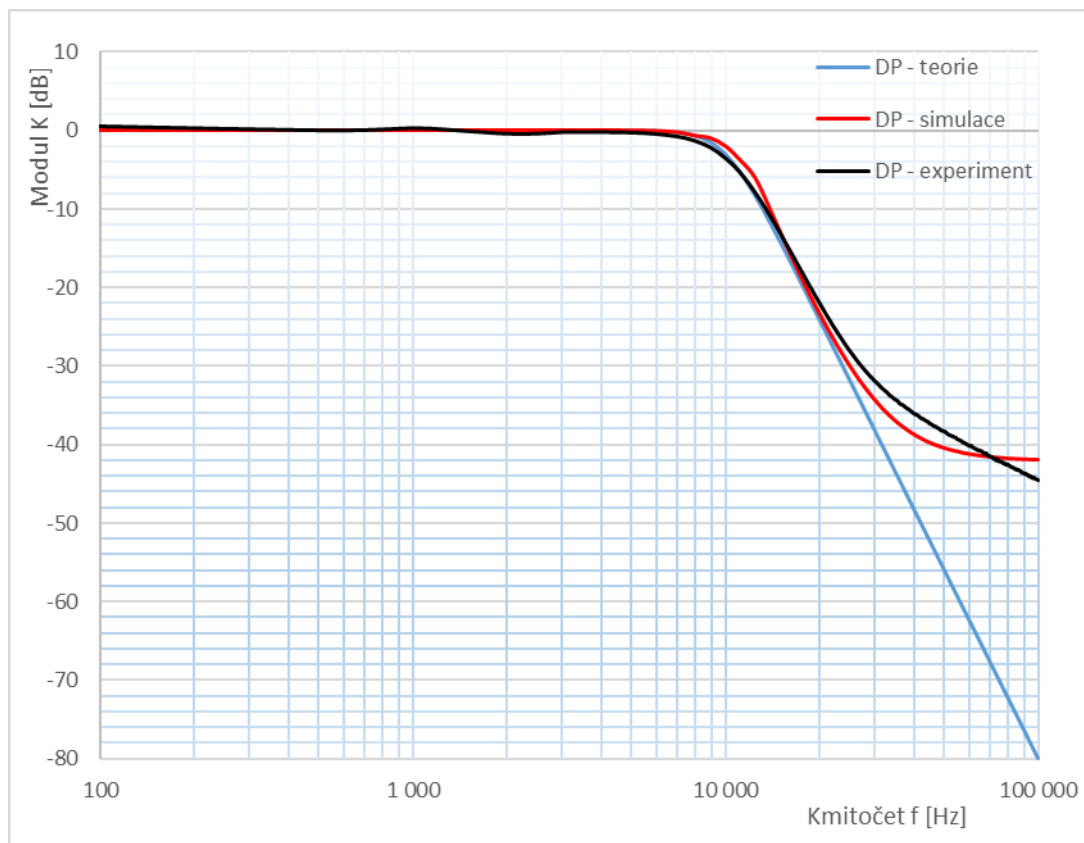
### 7.1 MĚŘENÍ A SIMULACE PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU

Zapojení filtru typu dolní propust čtvrtého řádu pracující v napěťovém režimu, které bylo simulováno a měřeno je na Obr. 6.1. Tento obvod je složený ze tří diferenčních rozdílových proudových konvektor DDCC a dvou proudových konvektorů druhé generace CCII. Pro experimentální měření byly využity tři univerzální proudové konvejory UCC-N1B. Konvejory byly transformovány na DDCC, a dva z těchto konvektorů byly také využity jako CCII. Vytvořená deska plošných spojů je uvedena v příloze A.

U simulace i experimentálního měření byl mezní kmitočet nastaven na  $f_0 = 10$  kHz a činitel jakosti  $Q = 0,707$  (Butterworthova aproximace) a hodnoty kondenzátorů  $C_1 = C_2 = C_3 =$



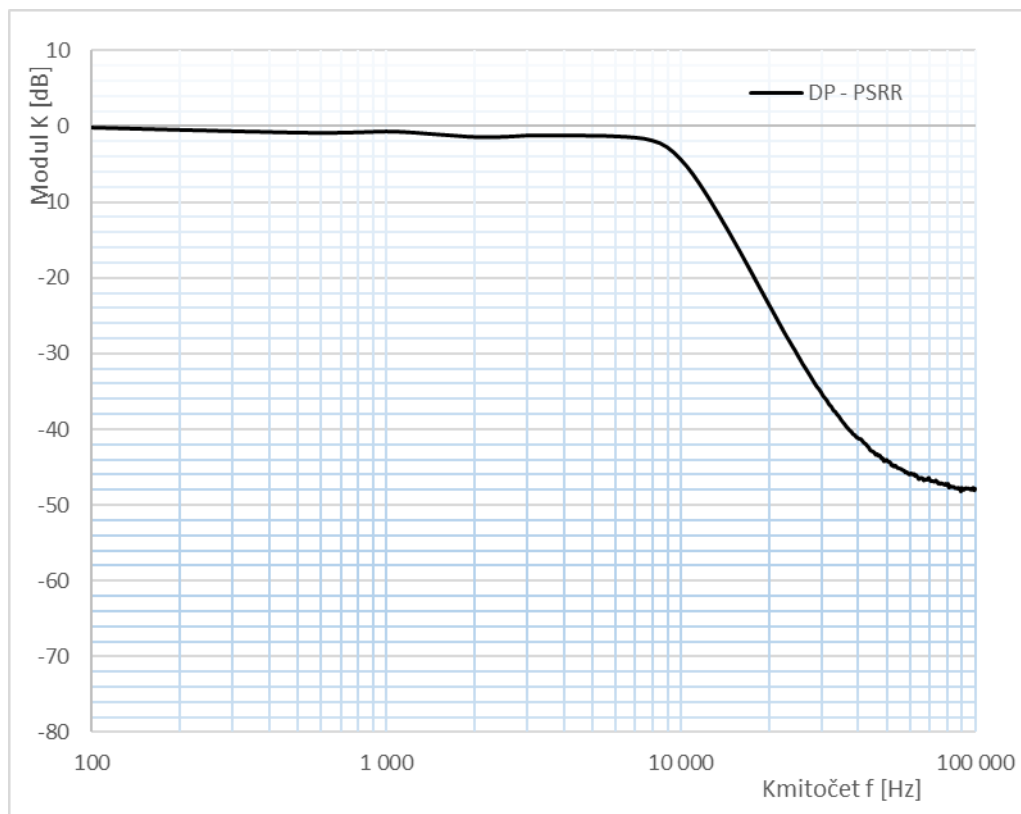
$C_4 = 10 \text{ nF}$ . Hodnoty rezistorů byly získány ze vztahů (6.4) až (6.7),  $R_1 = 609 \text{ } \Omega \approx 33 \text{ k}\Omega || 620 \text{ } \Omega$ ,  $R_2 = 1219 \text{ } \Omega \approx 1,6 \text{ k}\Omega || 5,1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 2437 \text{ } \Omega \approx 3 \text{ k}\Omega || 13 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 3551 \text{ } \Omega \approx 270 \text{ k}\Omega || 3,6 \text{ k}\Omega$ . Výsledky teoretické analýzy, simulace a experimentálního měření jsou zobrazeny na Obr. 7.2.



Obr. 7.2: Modulová charakteristika filtru dolní propust čtvrtého řádu

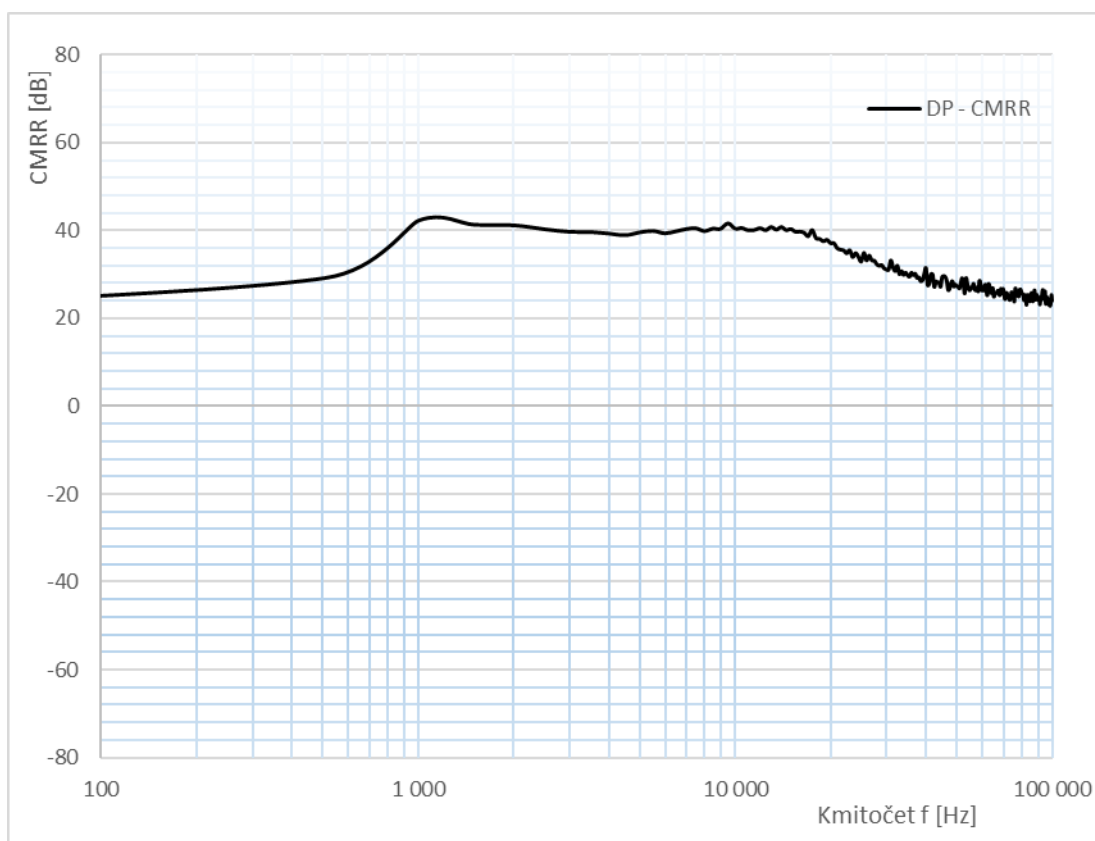
Při pohledu na graf je vidět, že při teoretický útlum je přibližně -80 dB, výsledek simulace a experimentálního měření je pouze přibližně -45 dB. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena parazitními vlastnostmi aktivních prvků, nebo kmitočtovými limity.

Jedním z dalších cílů bylo zjistit, jak pseudo-diferenční filtr reaguje na změnu napájecího napětí. Pro univerzální proudový UCC-N1B je optimální napájecí napětí  $\pm 1,65 \text{ V}$  a  $27 \text{ mA}$  je odběr na jeden proudový konvektor [16]. Napětí bylo změněno na  $\pm 1,50 \text{ V}$ , což je snížení cca o 9%. Na Obr. 7.3 je vidět, že změna napájecího napětí nemá, v tomto případě, téměř žádný vliv na přenosovou charakteristiku.

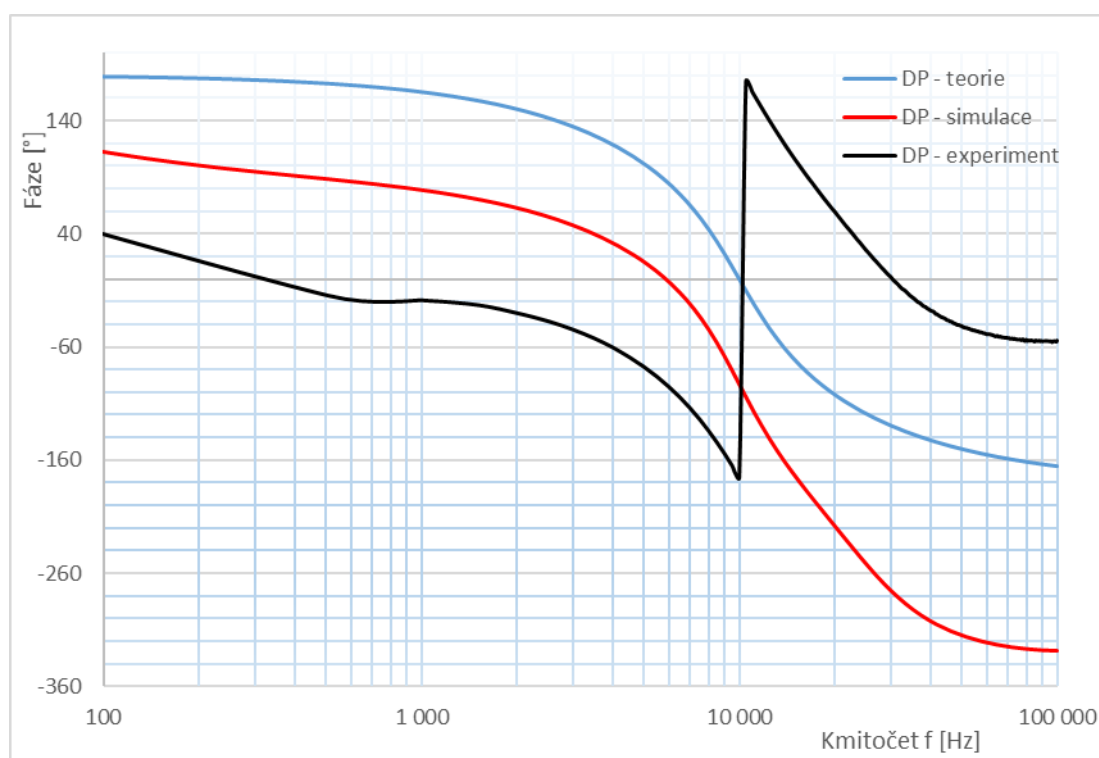


Obr. 7.3: Modulová charakteristika filtru při snížení napájecího napětí o 9%

Na Obr. 7.4 je znázorněn parametr CMRR (common-mode rejection ratio), který udává, zda je daný filtr schopen potlačit souhlasný signál. V tomto případě přenosová filtr potlačuje přibližně 40 dB, což lze považovat za uspokojivé.



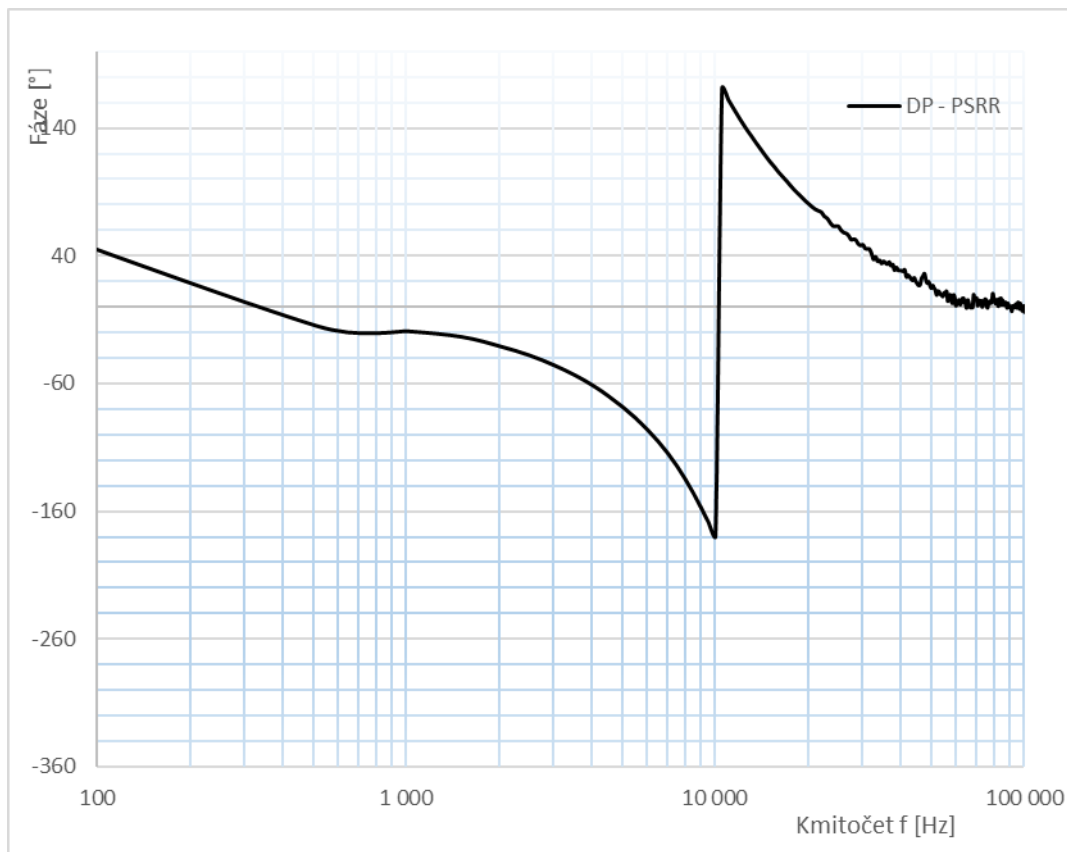
Obr. 7.4: Schopnost pseudo-diferenčního filtru potlačit souhlasný signál



Obr. 7.5: Fázová charakteristika filtru dolní propust čtvrtého řádu

Fázová charakteristika filtru typu dolní propust čtvrtého řádu je vyobrazena na Obr. 7.5. Obsahuje opět ideální, simulovanou a měřenou charakteristiku. Fázová charakteristika je

oproti ideální cca 40° posunuta, fázová charakteristika měřeného obvodu vykazuje velice špatné výsledky.



Obr. 7.6: Fázová charakteristika filtru při snížení napájecího napětí o 9%

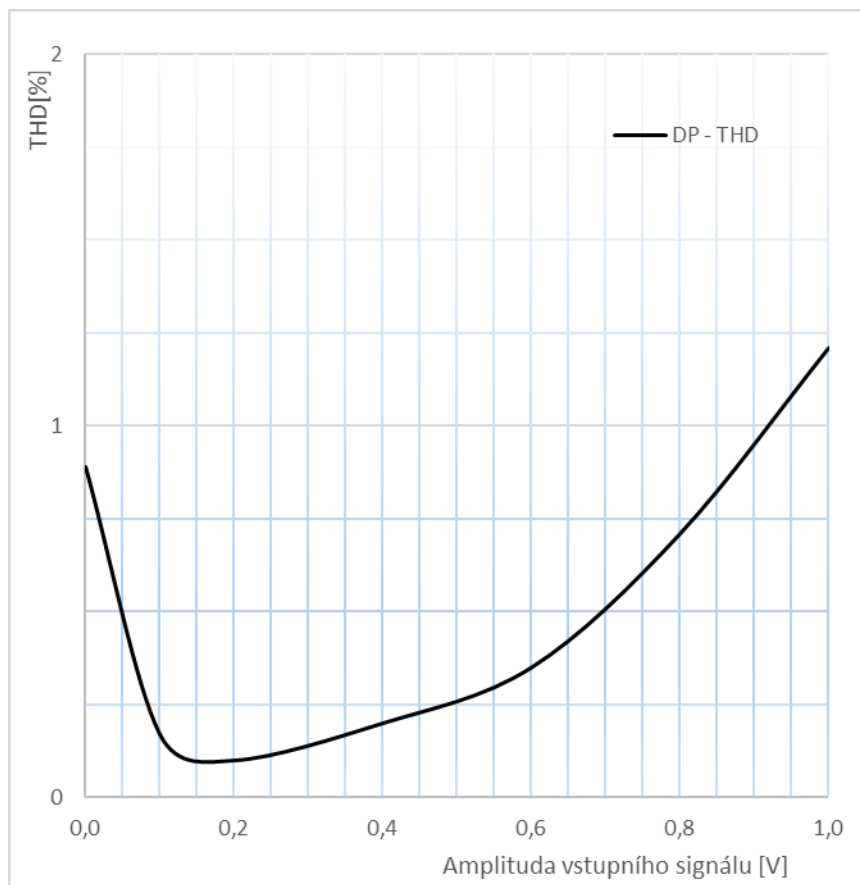
Vliv změny napájecího napětí byl také testován na fázové charakteristice. Stejně jako u modulové charakteristiky bylo napětí sníženo na  $\pm 1,50$  V, neboli o 9%. Ani u fázové charakteristiky nebyla zaznamenána žádná výrazná změna.

Posledním měřením bylo celkové harmonické zkreslení *THD* (total harmonic distortion). Definováno jako poměr všech vyšších harmonických složek ku základní harmonické. Je dáno následujícím vztahem:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (7.1)$$

Toto měření bylo pro optimální napájecí napětí, tj.  $\pm 1,65$  V. Při měření bylo počítáno s prvními pěti harmonickými složkami  $U_1$  až  $U_5$ . Pomocí vztahu (7.1) bylo vypočteno celkové harmonické zkreslení *THD*. Frekvence vstupního signálu byla nastavena na hodnotu 1 kHz, měnila se amplituda vstupního signálu a dočítali se hodnoty jednotlivých harmonických.

Z Obr. 7.7 je zjištěno, že celkové harmonické zkreslení je pod 1% pro amplitudu vstupního signálu do 1 V.



Obr. 7.7: Harmonické zkreslení filtru

## Závěr

Cílem této práce bylo prostudovat problematiku pseudo-diferenčního kmitočtového filtru a navrhnout funkční řešení pseudo-diferenčního kmitočtového filtru vyššího řádu pracujícího v napěťovém režimu.

V úvodní části práce byly shrnuty základní poznatky o kmitočtových filtrech, jejich typech a využití. Následuje rozbor diferenčních a pseudo-diferenčních přenosů a jejich transformace s jednotlivými ukázkami. Další část obsahuje popis použitých aktivních prvků (konvektorů) v navržených strukturách (CCII, DVCC, DDCC, UCC). V další části se práce věnuje vlastnímu návrhu pseudo-diferenčního filtru.

Na základě poznatků byl navržen pseudo-diferenční filtr typu dolní propust čtvrtého řádu v programu Snap, následně byly navrženy všechny pasivní součástky, nastaven mezní kmitočet  $f_0$  a obvod byl odsimulován pro dva typy aktivních prvků (UCC-1L a reální čip UCC-3L) v prostředí OrCAD. Dále byl obvod navrhnut v programu Eagle.

V praktické části byla experimentálně ověřena funkčnost pseudo-diferenčního filtru. V kapitole 7 byly tyto struktury porovnávány se simulacemi a ideálními průběhy. Měření probíhalo pro napájecí napětí  $\pm 1.65$  V a pro snížené napájecí napětí  $\pm 1.53$  V. Při experimentálním měření pro napětí  $\pm 1.65$  V se obvod nechoval podle očekávání a podle teoretických poznatků. Po snížení vstupního napětí obvod nevykazoval žádné velké změny, odchylka byla zanedbatelná.

V poslední části jsou porovnány výsledky z pohledu potlačení souhlasného signálu a celkové zkreslení zpracovávaného signálu.

## Seznam použité literatury

- [1] CHAN, K.: Design of Differential Filters for High-Speed Signal Chains, Application repor, Texas Instruments, SLWA053B, 8 pages, 2010.
- [2] KOTON, J.; HERENCŠÁR, N.; SLÁDOK, O.; HORNG, J. Pseudo-differential second-order band- reject filter using current conveyors. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2016, roč. 70, č. 6, s. 814-821. ISSN: 1434-8411.
- [3] HÁJEK, K a SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [4] VRBA, K. Analogová technika: Vysoké učení technické v Brně, 2012, ISBN: 978- 80-214-4458-4.
- [5] JEŘÁBEK, J. *Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 70 s. Vedoucí doktorské práce prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
- [6] SLÁDOK, O. *Diferenční a pseudodiferenční kmitočtové filtry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 100 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D..
- [7] CHEN, W. K. The Circuits and Filters Handbook, New York, CRC Press, 2003, 2.vydání.
- [8] SLÁDOK, O. *Diferenční struktury lineárních obvodů s DDCC a DVCC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 65 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.
- [9] SUN, Y. *Design of High Frequency Integrated Analogue Filters*, IET 2002.
- [10] KUBÁNEK, D. Teoretický návrh ADSL Splitterů. Studijní zpráva pro STROM telecom. Ústav telekomunikací, FEKT, VUT v Brně, 2003. 119 pages.
- [11] KOTON, J.; HERENCŠÁR, Analogové technologie pro společné výuky programu VUT v Brně a VŠB-TUO, Skripta 131 - 135, vydáno: 8.12.2014. [12] HORNG, J. V., WU, C. M,

HERENCSAR, N., Fully differential first-order allpass filters using a DDCC, Indian J. Engineering and Materials Sciences 21 (2014), 345-350.

[12] HORNG, J. V., WU, C. M, HERENCSAR, N., Fully differential first-order allpass filters using a DDCC, Indian J. Engineering and Materials Sciences 21 (2014), 345-350.

[13] IBRAHIM, M. A, KUNTMAN, H. A Novel High CMRR High Input Impedance Differential Voltage-Mode KHN-Biquad Employing DO-DDCCs, Int. J. Electron. Commun. - AEU 58(2004) 429-433.

[14] BEČVÁŘ, D.; VRBA, K. Univerzální proudový konvektor [online]. Elektronický časopis. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00007/index.html>.

[15] MT-043, TUTORIAL. Op Amp Power Supply Rejection Ratio (PSRR) and Supply Voltages

[16] Datasheet UCC-N1B - Universal Current Conveyor (UCC) and Second-Generation Current Conveyor (CCII+/-), Brno University of Technology, On Semiconductor Ltd., Rev. 1, 2012



# SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

$I_1$	proud na vstupu [A]
$I_2$	proud na výstupu [A]
$I_x$	proud na uzlu X [A]
$I_y$	proud na uzlu Y [A]
$I_z$	proud na uzlu Z [A]
$U_x$	napětí na uzlu X [V]
$U_y$	napětí na uzlu Y [V]
$U_z$	napětí na uzlu Z [V]
$U_1$	vstupní napětí [V]
$U_{in}$	diferenční vstupní napětí [V]
$U_2$	výstupní napětí [V]
$U_{out}$	diferenční výstupní napětí [V]
$\omega_0$	úhlová frekvence [s <sup>-1</sup> ]
$f_0$	mezní kmitočet [Hz]
$K_U$	přenos napětí
$K_I$	přenos proudu
$K_{(p)}$	přenosová funkce
DP	dolní propust (Low-Pass)
HP	horní propust (High-Pass)
PP	pásmová propust (Band-Pass)
PZ	pásmová zádrž (Band-Reject)
FČ	fázovací článek (All-Pass)
R	rezistor [ $\Omega$ ]
C	kondenzátor [F]
Q	činitel jakosti [-]
UCC	univerzální proudový konvektor ( universal current conveyor)
DVCC	diferenční proudový konvektor (differential current voltage conveyor)
DDCC	diferenční rozdílový proudový konvektor (differential difference current conveyor)
CCII	proudový konvektor druhé generace
Y	vstupní svorka konvektoru
X	vstupní svorka konvektoru
$Z_+$	výstupní svorka konvektoru
$Z_-$	výstupní svorka konvektoru
CMRR	common-mode rejection ratio
PSRR	Power supply rejection ratio
$\pi$	Ludolfovo číslo (3,1415926535 [-])

## OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

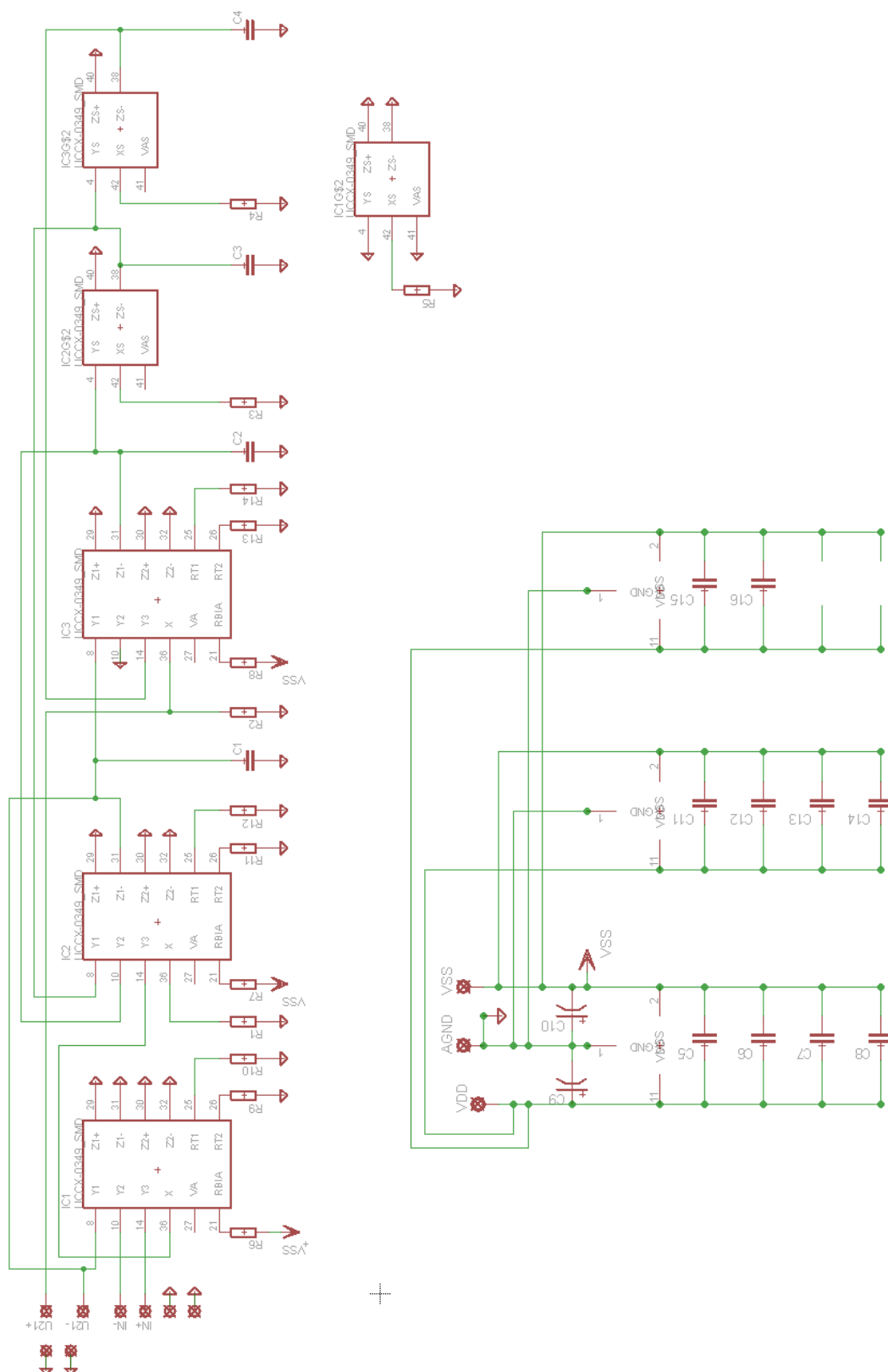
CD přiložené k diplomové práci obsahuje text práce, návrh zapojení v programu Snap v3, Eagle v6.5.0 a excel s výstupem z obvodového analyzátoru Agilent 4395A.

# PŘÍLOHY

Příloha A – Provedení pseudo-diferenčního filtru

Příloha B – Originální výsledky měření získané z obvodového analyzátoru Agilent 4395 A

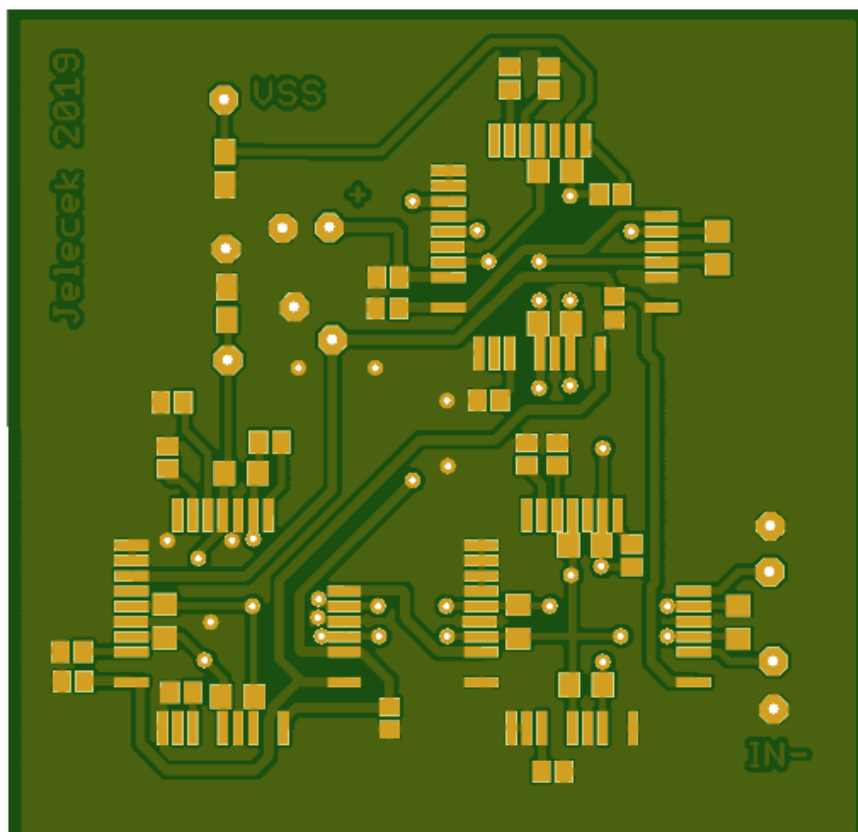
## Příloha A – PROVEDENÍ PSEUDO-DIFERENČNÍHO FILTRU



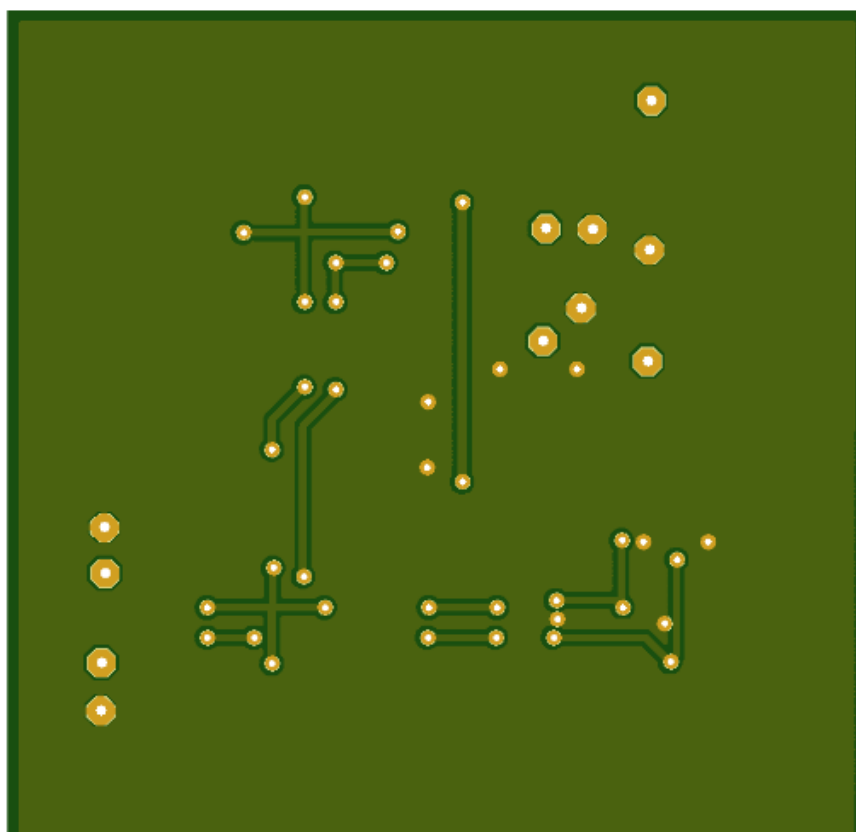
Obr. A.0.1: Schéma pseudo-diferenčního filtru

### Seznam součástek:

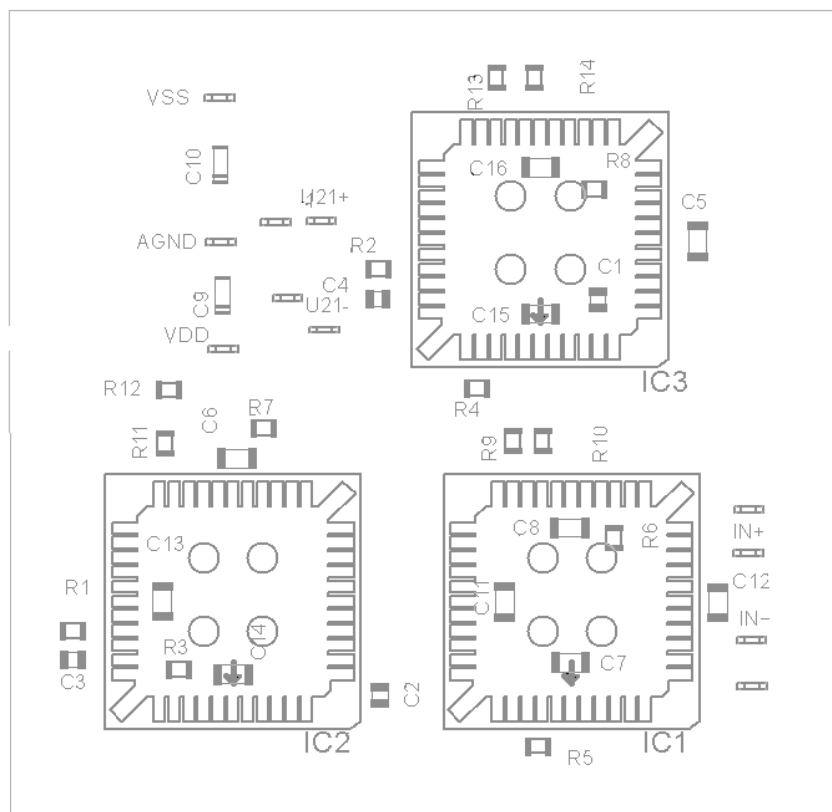
$R_1 = 33\text{k}\Omega    620\Omega$	M0805
$R_2 = 1,6\text{k}\Omega    5,1\text{k}\Omega$	M0805
$R_3 = 3\text{k}\Omega    13\text{k}\Omega$	M0805
$R_4 = 270\text{k}\Omega    3,6\text{k}\Omega$	M0805
$R_5 = 1\text{k}\Omega$	M0805
$R_6 = 4,7\text{k}\Omega$	M0805
$R_7 = 4,7\text{k}\Omega$	M0805
$R_8 = 4,7\text{k}\Omega$	M0805
$R_9 = 8,2\text{k}\Omega$	M0805
$R_{10} = 8,2\text{k}\Omega$	M0805
$R_{11} = 8,2\text{k}\Omega$	M0805
$R_{12} = 8,2\text{k}\Omega$	M0805
$R_{13} = 8,2\text{k}\Omega$	M0805
$R_{14} = 8,2\text{k}\Omega$	M0805
$C_1 = 10\text{nF}$	M0805
$C_2 = 10\text{nF}$	M0805
$C_3 = 10\text{nF}$	M0805
$C_4 = 10\text{nF}$	M0805
$C_5 = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_6 = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_7 = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_8 = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_9 = 4,7\mu\text{F}$	M1206
$C_{10} = 4,7\mu\text{F}$	M1206
$C_{11} = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_{12} = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_{13} = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_{14} = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_{15} = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
$C_{16} = 68\text{pF}    47\text{nF}$	M0805
UCC-N1B520	PLCCSM44 / 3x



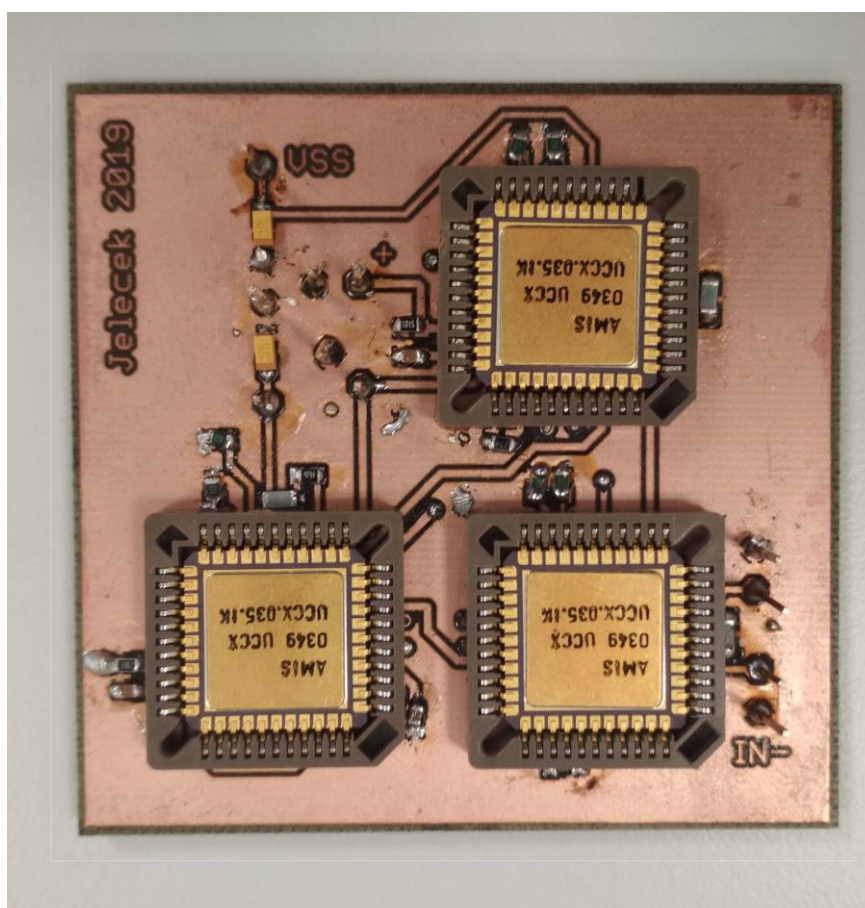
Obr. A.0.2: Návrh desky plošných spojů ze shora



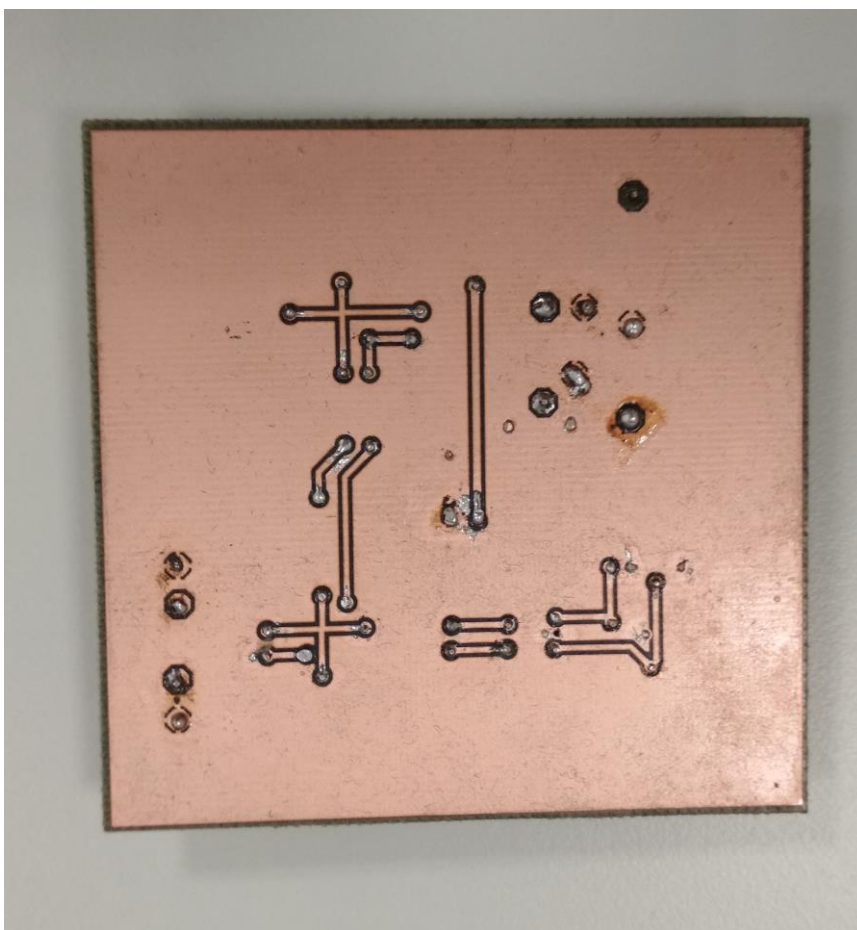
Obr. A.0.3: Návrh desky plošných spojů ze zdola



Obr. A.0.4: Návrh desky plošných spojů (součástky)



Obr. A.0.5: Fotografie pseudo-diferenčního filtru pohled ze shora

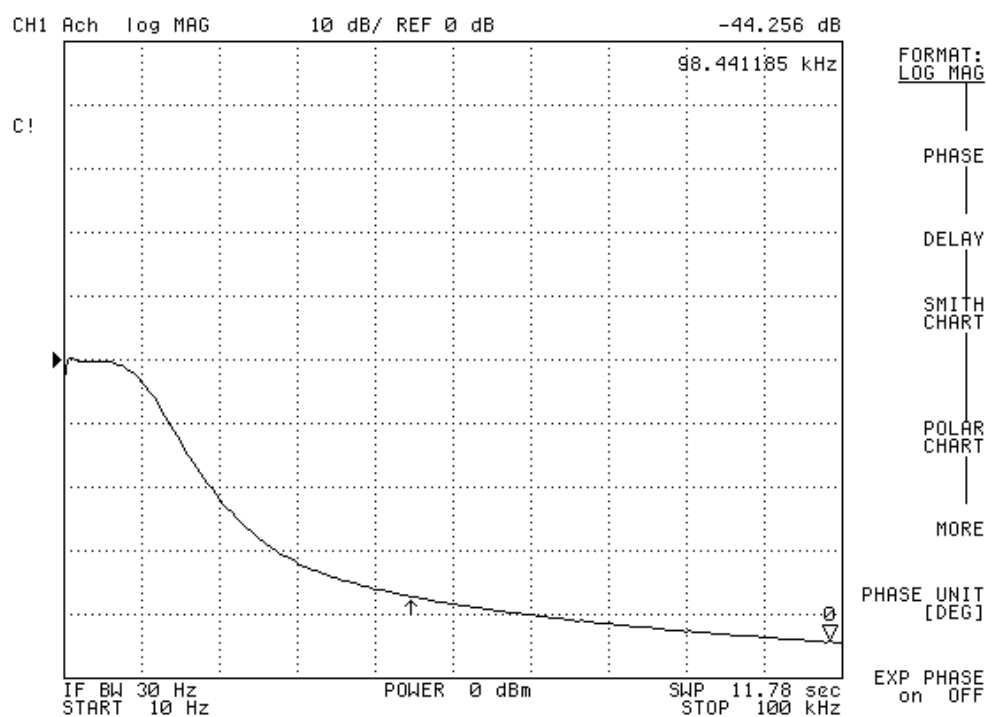


Obr. A.0.6: Fotografie pseudo-diferenčního filtru pohled ze zdola

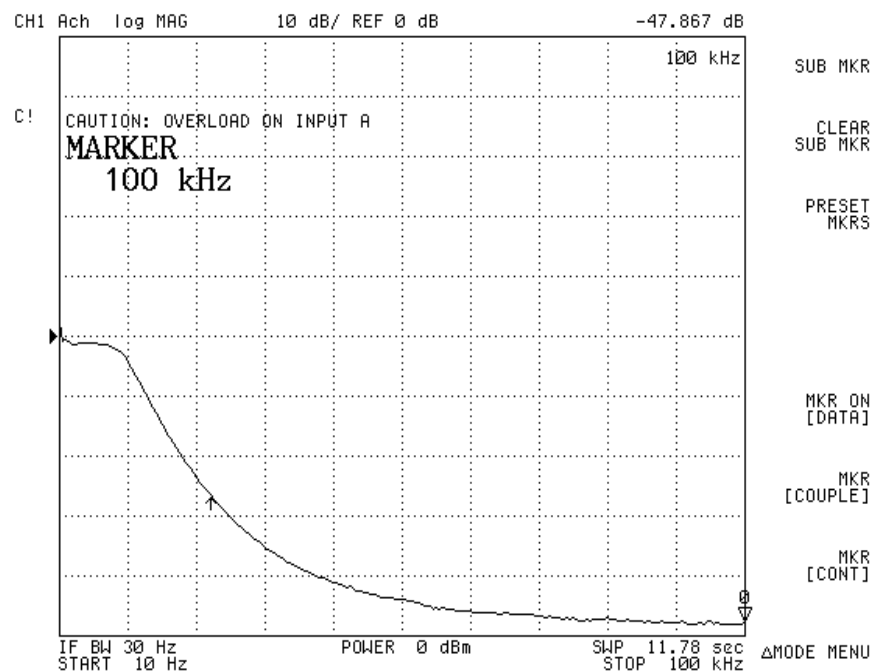


# Příloha B – ORIGINÁLNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZÍSKANÉ Z OBVODOVÉHO ANALYZÁTORU AGILENT 4395A

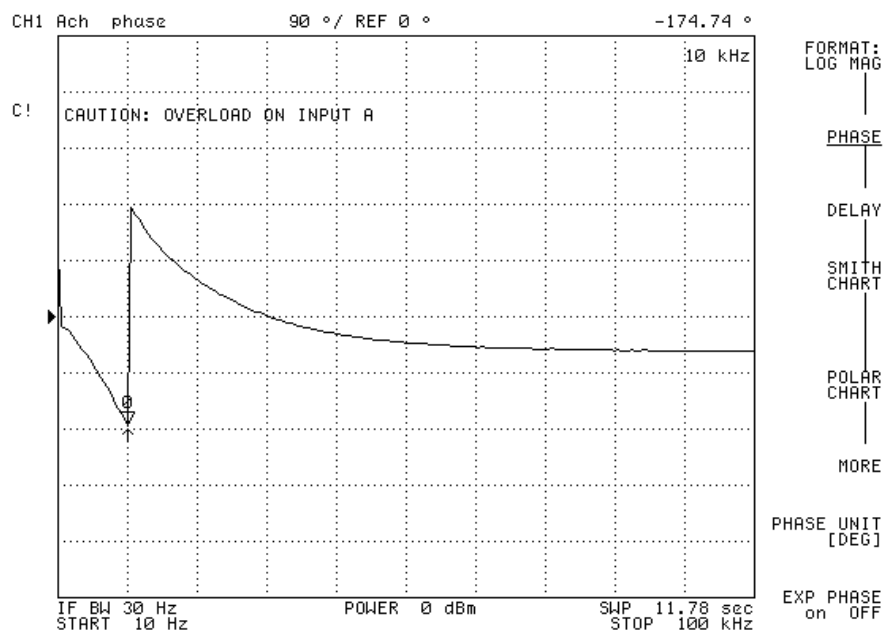
Originální grafické zobrazení získané praktickým měřením z obvodového analyzátoru Agilent 4395A



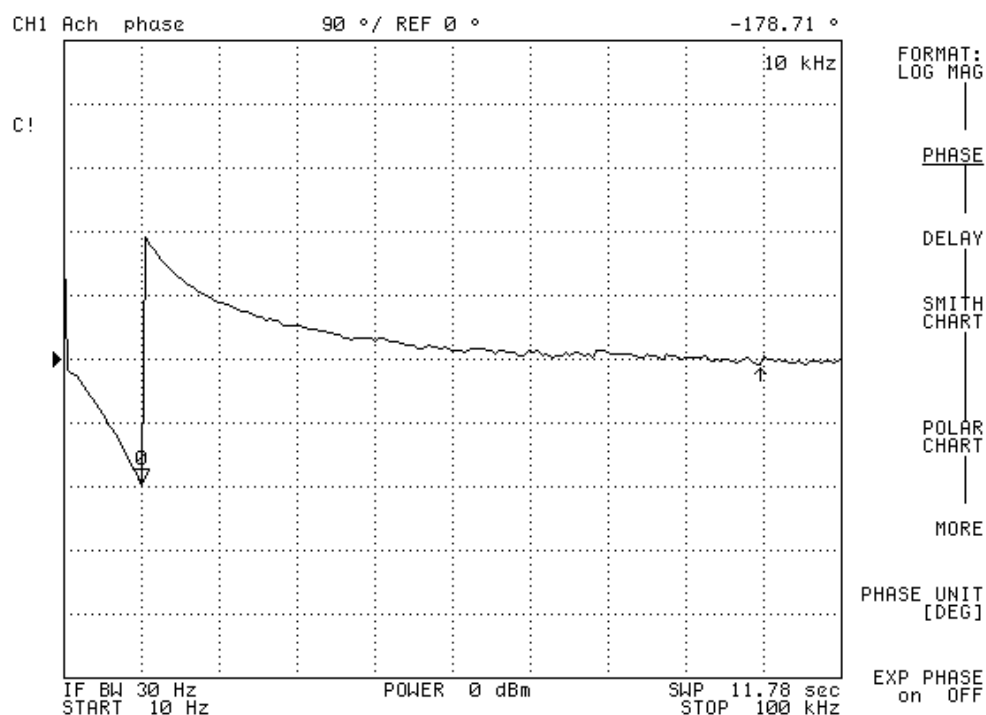
Obr. B.0.1: Originální výsledek modulové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení  $\pm 1.65$  V



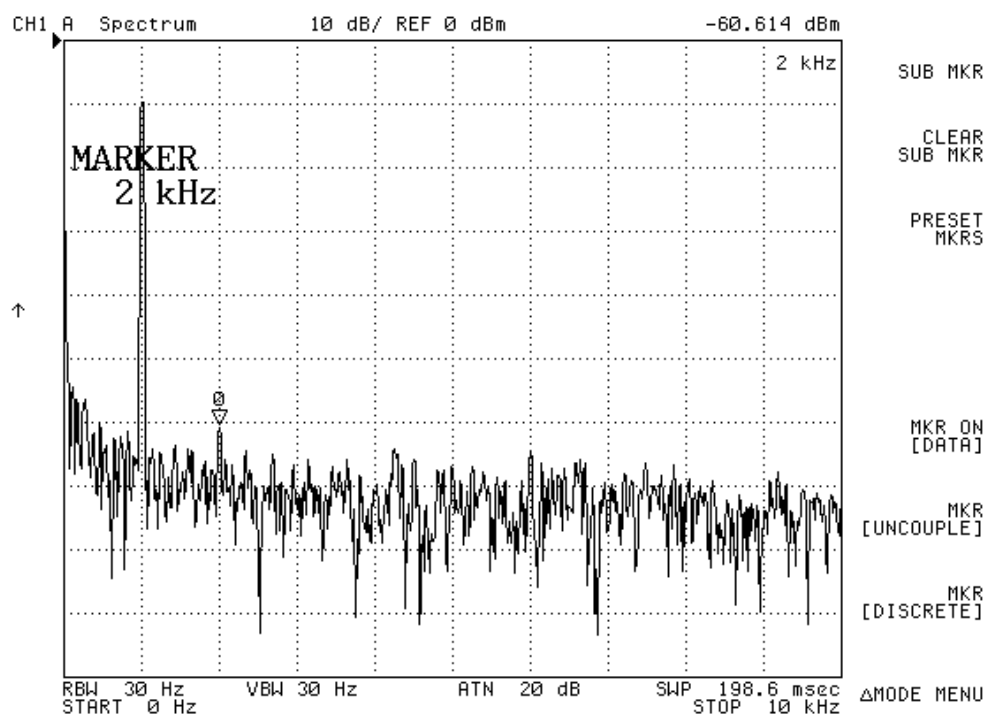
Obr. B.0.2: Originální výsledek modulové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení  $\pm 1.50V$



Obr. B.0.3: Originální výsledek fázové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení  $\pm 1.65V$



Obr. B.0.4: Originální výsledek fázové charakteristiky pseudo-diferenčního filtru při napájení  $\pm 1.50$  V



Obrázek B.0.5: Ukázka z měření harmonického zkreslení